



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação
Departamento de Eletrônica e Microeletrônica

Estudo da distribuição da temperatura em encapsulamentos de dispositivos MOSFET utilizando simulação por métodos de elementos finitos

Autor: **Filipe Dias Baumgratz**

Orientador: **Prof. Dr. Marco Antônio Robert Alves**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Área de concentração: **Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica**

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Marco Antônio Robert Alves - FEEC/UNICAMP

Prof. Dr. Evandro Mazina Martins - UFMS

Prof. Dr. Edmundo da Silva Braga - FEEC/UNICAMP

Campinas/SP, 14 de Dezembro de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B327e Baumgratz, Filipe Dias
Estudo da distribuição da temperatura em
encapsulamentos de dispositivos MOSFET utilizando
simulação por métodos de elementos finitos / Filipe Dias
Baumgratz. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Marco Antônio Robert Alves.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de
Computação.

1. Encapsulamento. 2. Método de elementos finitos.
3. Simulação por computador. 4. Calor - Transmissão.
5. Temperatura. I. Alves, Marco Antônio Robert. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: Study about temperature distribution in a MOSFET device package
using finite element method simulation

Palavras-chave em Inglês: Package, Finite element method, Computer simulation, Heat
- Transmission, Temperature

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Evandro Mazina Martins, Edmundo da Silva Braga

Data da defesa: 14-12-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Filipe Dias Baumgratz

Data da Defesa: 14 de dezembro de 2011

Título da Tese: "Estudo da distribuição da temperatura em encapsulamentos de dispositivos MOSFET utilizando simulação por métodos de elementos finitos"

Prof. Dr. Marco Antônio Robert Alves (Presidente): Marco A. R. Alves

Prof. Dr. Evandro Mazina Martins: [Assinatura]

Prof. Dr. Edmundo da Silva Braga: [Assinatura]

Agradecimentos

- Primeiramente a Deus.
- Aos meus pais, Carlos e Leila, pela formação que me deram e por sempre apoiarem meus projetos de maneira incondicional.
- Aos meus tios, Roberto e Ronaldo, pelo apoio. Ao meu irmão, Thiago, pelos serviços de *office boy*.
- A Cíntia, pelo incentivo, ajuda e pelos ensaios pré-defesa.
- A todos os amigos pelo apoio, amizade e por escutarem as minhas reclamações. Principalmente ao Glauco, pelas correções no texto da minha dissertação.
- Ao professor Dr. Marco Antonio Robert Alves pela orientação. Aos membros da banca examinadora pelas correções.
- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Resumo

O transistor MOSFET teve uma evolução muito grande desde sua invenção até os dias de hoje. As dimensões foram reduzidas, a capacidade de integração de componentes e frequência de operação aumentaram, como consequência desta evolução houve um aumento da potência dissipada pelos circuitos integrados. Neste trabalho foi utilizada simulação por elementos finitos para estudar o comportamento térmico de um encapsulamento ao variar-se sua montagem interna, utilizando um MOSFET de potência como fonte de calor. A partir destas simulações foi possível indentificar os pontos de maior e menor temperatura, bem como as regiões de melhor condução de calor. Ainda utilizando simulação por elementos finitos estudou-se o efeito da variação do tempo de chaveamento nas temperaturas observadas no interior do encapsulamento.

Palavras-chave: Encapsulamento, MOSFET, método de elementos finitos, simulação, tempo de chaveamento, temperatura, condução de calor.

Abstract

The transistor had a great evolution since its invention until today. The dimensions were reduced, the components integration and operating frequency increased, a result of these developments is higher power dissipation in integrated circuits. This work use finite element method simulation to study the thermal behavior of a package with different internal assembly, using a power MOSFET as heat source. From these simulations it is possible to identify the points of high and low temperature, and best thermal paths. Still using finite element method simulation was studied the effect of switching time in the thermal behavior of the package.

Keywords: Package, MOSFET, finite element method, simulation, switching time, temperature, heat conduction.

Lista de Figuras

1.1	Evolução da frequência dos microprocessadores até 2003.[1, 2]	2
1.2	Aumento da temperatura de operação em circuitos integrados com a redução das dimensões da tecnologia.[3]	3
2.1	Seção transversal de um MOSFET canal n, mostrando os terminais e a direção dos portadores e do fluxo de corrente.[4]	6
2.2	Curvas $I_D \times V_D$ para um MOSFET.[4]	7
2.3	Aplicações para o transistor MOSFET de potência.	9
2.4	Estruturas verticais de um MOSFET de potência.[5]	9
2.5	Queda de tensão, corrente e perda de potência em um transistor.[6]	13
2.6	Resistências parasitas de um U-MOSFET.[5]	14
2.7	Capacitâncias parasitas de um U-MOSFET.[5]	15
2.8	Curvas mostrando a variação da condutividade térmica com o aumento da temperatura.	18
2.9	Representação da transmissão de calor através de superfícies planas em série (a) e sua representação através de resistências térmicas (b).	22
2.10	Representação da transmissão de calor através de superfícies planas em paralelo (a) e sua representação através de resistências térmicas (b).	22
2.11	Convecção natural sobre um superfície vertical, com temperatura da superfície maior que a temperatura do fluido (a) e com a temperatura da superfície menor que a temperatura do fluido (b). [7]	24
2.12	Camada limite de altura δ . [8]	25
2.13	Camada limite em uma superfície plana e longa, mostrando a variação do tipo de escoamento. [8]	27
2.14	Camada limite térmica durante o fluxo de fluido frio sobre uma placa quente. [8]	30
2.15	Fluxograma das simulações.	32
2.16	Modelo de chip desenhado a partir de uma ferramenta CAD.	33
2.17	Malha gerada para o modelo a ser simulado.	34
2.18	Resultado obtido através da simulação.	35
3.1	Montagens internas Standard (a), Standard with Thermally Enhanced Leadframe (b) e Exposed Pad (c). [9]	37
3.2	Modelos CAD das montagens internas Standard (a), Thermally Enhanced Leadframe (b) e Exposed Pad (c).	38

3.3	Menu Subdomain Settings, onde é feita a configuração das regiões internas no modelo simulado. Mostrando a configuração realizada para a pastilha de silício.	40
3.4	Menu “Boundary Settings”, onde é feita a configuração das interfaces do modelo simulado.	41
3.5	Curvas da variação de tensão e corrente no tempo, referente ao controle de um pequeno motor elétrico de um automóvel KIA.	42
3.6	Malha triangular de 65756 elementos, construída com tamanhos máximos de elementos de malha diferentes para cada região.	45
3.7	Malha quadrilateral de 33668 elementos.	46
3.8	Malha triangular dos fios de ouro.	47
3.9	Malha mista utilizada para realizar as simulações dos modelos.	47
3.10	Método de solução e algoritmo de resolução do sistema linear.	48
3.11	Menu de gerenciamento da simulação.	49
3.12	Montagem interna <i>Exposed pad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio.	50
3.13	Malha quadrilateral de 5385 elementos, utilizada para descrever o modelo <i>Exposed pad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio.	51
3.14	Curva de corrente da carga resistiva.	52
3.15	Curva de tensão da carga resistiva.	53
4.1	Gráfico temperatura versus tempo, mostrando a variação da temperatura no centro da pastilha para a montagem interna <i>Standard</i>	55
4.2	Gráfico temperatura versus tempo, mostrando a variação da temperatura no centro da pastilha para a montagem interna <i>STEL</i>	55
4.3	Gráfico temperatura versus tempo, mostrando a variação da temperatura no centro da pastilha para a montagem interna <i>EPad</i>	56
4.4	Gráfico das linhas de fluxo de calor para a montagem <i>Standard</i> no ponto de máxima temperatura.	58
4.5	Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna <i>Standard</i> , quando tem-se o maior valor de temperatura no encapsulamento.	59
4.6	Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna <i>Standard</i>	60
4.7	Gráfico das linhas de fluxo de calor para a montagem <i>STEL</i> no ponto de máxima temperatura.	61
4.8	Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna <i>STEL</i> , quando tem-se o maior valor de temperatura no encapsulamento.	62
4.9	Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna <i>STEL</i>	63
4.10	Gráfico das linhas de fluxo de calor para a montagem <i>EPad</i> no ponto de máxima temperatura.	64
4.11	Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna <i>EPad</i> , quando tem-se o maior valor de temperatura no encapsulamento.	65
4.12	Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna <i>EPad</i>	66
4.13	Gráfico temperatura versus tempo, mostrando a variação da temperatura no centro da pastilha para a montagem interna <i>EPad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio.	68

4.14	Gráfico das linhas de fluxo de calor para a montagem <i>EPad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio no ponto de máxima temperatura.	69
4.15	Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna <i>EPad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio, quando tem-se o maior valor de temperatura no encapsulamento.	69
4.16	Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna <i>EPad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio.	70
4.17	Potência dissipada por MOSFET de potência durante chaveamento, para tempos de chaveamento diferentes.	71
4.18	Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna <i>EPad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio, para tempo de chaveamento de 0,52 segundos.	72
4.19	Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna <i>EPad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio, para tempo de chaveamento de 1,10 segundos.	73
4.20	Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna <i>EPad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio, para tempo de chaveamento de 1,67 segundos.	73
4.21	Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna <i>EPad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio, para tempo de chaveamento de 2,25 segundos.	74

Lista de Tabelas

2.1	Analogia entre equações de transmissão de calor e de transmissão de eletricidade. [9]	21
3.1	Materiais utilizados nos modelos de encapsulamentos simulados.	39
3.2	Valores dos parâmetros constantes da equação 3.2. O valor de h foi obtido na referência [10].	40
3.3	Materiais utilizados no modelo de encapsulamento simulado.	49
3.4	Valores de corrente e tensão carga, tensão de alimentação do MOSFET e tempo de chaveamento para cada uma das curvas simuladas.	52
4.1	Temperaturas obtidas ao simular-se a dissipação de calor de um MOSFET de potência com a mesma carga, mas encapsulado com diferentes montagens internas. .	57
4.2	Temperaturas obtidas ao simular-se a dissipação de calor de um MOSFET de potência com carga resistiva, utilizando as montagens internas <i>Standard</i> , <i>STEL</i> , <i>EPad</i> e <i>EPad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio.	67
4.3	Temperatura máxima obtida para cada tempo de chaveamento.	72

Sumário

1	Introdução	1
2	Considerações Teóricas	5
2.1	Transistor MOSFET	5
2.1.1	Transistor MOSFET de Potência	8
2.1.2	Chaveamento do MOSFET de potência	12
2.2	Transmissão de calor	15
2.2.1	Condução	17
2.2.2	Convecção	22
2.3	Programa de simulação	31
2.3.1	Construção do modelo	31
2.3.2	Construção da malha	32
2.3.3	Simulação	34
3	Metodologia das simulações	36
3.1	Modelagem da simulação térmica de encapsulamento PQFN com montagens internas modificadas	36
3.1.1	Construção do modelo a ser simulado	37
3.1.2	Construção da malha para os modelos	42
3.1.3	Definição dos parâmetros e gerenciamento da simulação	46
3.2	Modelagem da simulação térmica de encapsulamento PQFN com montagem <i>Exposed pad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio	48
3.3	Modelagem da simulação térmica mostrando a influência do tempo de chaveamento na temperatura do encapsulamento	51
4	Resultados e Análises	54
4.1	Resultados da simulação térmica de encapsulamento PQFN com montagens internas modificadas	54
4.2	Resultado da simulação térmica de encapsulamento PQFN com montagem <i>Exposed pad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio	67
4.3	Resultado da simulação térmica mostrando a influência do tempo de chaveamento na temperatura do encapsulamento	71
4.4	Comentários finais	74

5	Conclusões	76
5.1	Propostas para trabalhos futuros	78
	Referências Bibliográficas	79

Capítulo 1

Introdução

Os dispositivos de estado sólidos surgiram em 1947 com a construção do primeiro transistor por John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley, e ganharam mais força com o surgimento do transistor metal-óxido-semicondutor de efeito de campo (MOSFET), desenvolvido por D. Kahng e M. Atalla, desde então sua tecnologia tem se desenvolvido muito rapidamente.

A dimensão mínima do transistor é reduzida por um fator 2 a cada seis anos e a cada quatro anos a área máxima do chip é aumentada por um fator 2. A evolução da eficiência de empacotamento que até a década de 70 era de 21 vezes por década passou para 2.1 vezes por década. A combinação destas condições provocaram um grande aumento no número de dispositivos de estado sólido por chip, dobrando esse número a cada 18 meses ao longo das últimas 4 décadas [11].

A evolução dos transistores não se limitaram apenas a suas dimensões: a cada nova geração de tecnologia o atraso da porta diminui 30%, resultando no aumento de 43% da frequência de operação. Ao observarmos a evolução das frequências de operação dos microprocessadores, mostrada na figura 1.1, a evolução tem sido ainda maior, aproximadamente 100% cada nova geração. [1, 2]

Apesar de todos os benefícios proporcionados por estas evoluções, o aumento da potência dissipada no chip tornou a temperatura de operação um motivo de preocupação para os projetistas, como mostrado na figura 1.2 em transistores menores que $1\mu m$ a potência dissipada supera os $100W/cm^2$. Consequentemente são observadas temperaturas de operação mais elevadas, que afetam a performance e durabilidade do chip e de seus componentes adjacente.

Uma vez que as perdas de potência em um chip estão diretamente relacionadas com sua tem-

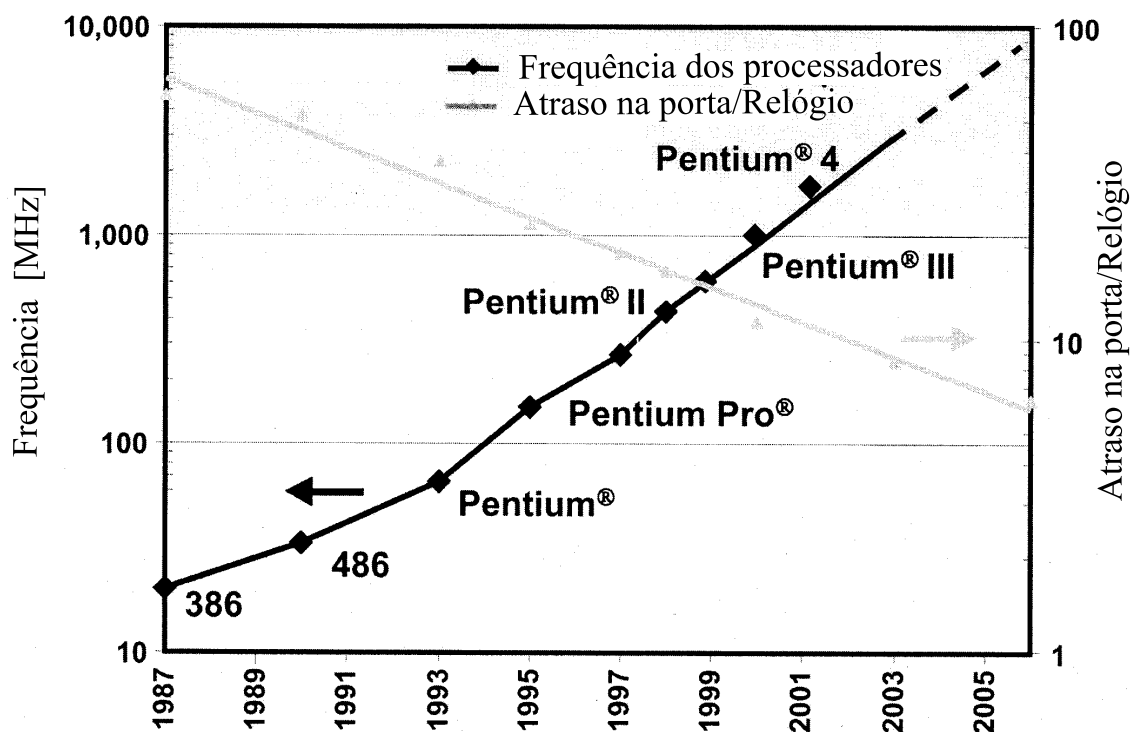


Fig. 1.1: Evolução da frequência dos microprocessadores até 2003.[1, 2]

peratura, é necessário fazer uma análise acoplando as características térmicas e elétricas do chip encapsulado (dispositivo). Em análises onde diferentes domínios são acoplados a utilização de simuladores baseados em elementos finitos (FEM) têm se mostrado muito eficiente e sua utilização está em crescimento na indústria de eletrônica e microeletrônica, pois possibilita a redução dos custos e o tempo de desenvolvimento do projeto.

O projeto de um produto se baseia em cálculos, construção e teste de protótipos. Mesmo os cálculos sendo muito precisos, sempre serão necessário ajustes experimentais feitos de modo iterativo até que o produto atinja as especificações desejadas, consumindo tempo e dinheiro do projeto. Ao utilizar a simulação por método dos elementos finitos parte dos testes com protótipos não serão mais necessários, pois os resultados obtidos através de simulação são muito próximos dos obtidos com protótipos. [12–15] A vários anos a simulação por elementos finitos vêm sendo empregada nas áreas de engenharia mecânica e química, por exemplo na indústria automotiva, mas mas só nos últimos anos começou a ser empregado na Engenharia Elétrica para o desenvolvimento de

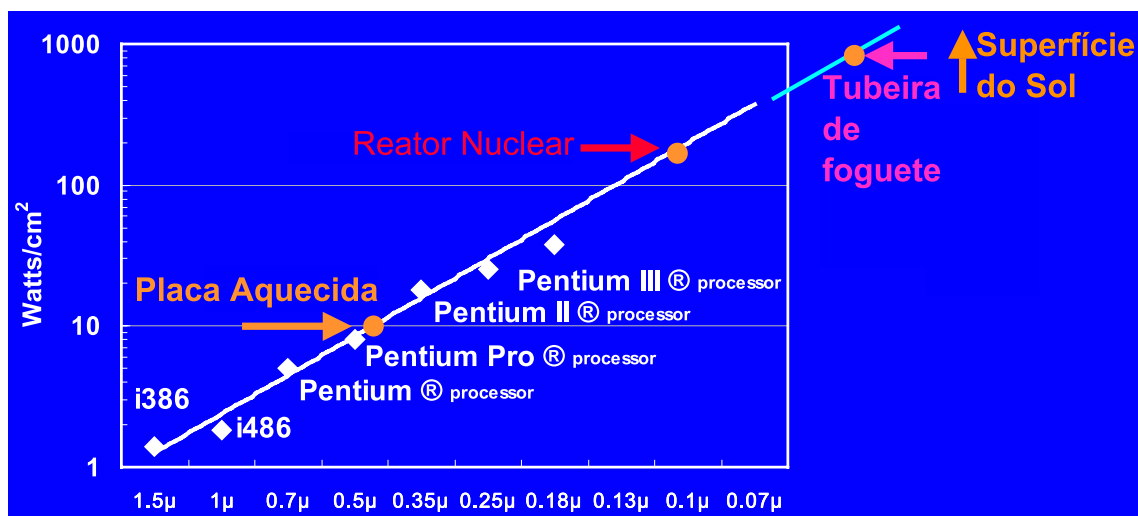


Fig. 1.2: Aumento da temperatura de operação em circuitos integrados com a redução das dimensões da tecnologia.[3]

componentes eletrônicos.

A motivação desta dissertação é a crescente utilização de dispositivos de estado sólido, como o *extreme switch* [16, 17], em aplicações onde são empregados altos valores de corrente e tensão, resultando em altos valores de potência dissipada pelo dispositivo. E a análise de dispositivos de estado sólidos utilizando-se simulação por método dos elementos finitos (FEM), de modo a reduzir o tempo e custo de projeto, mas sem perder qualidade no produto final.

Baseando-se nas motivações, os objetivos desta dissertação são:

- O estudo da variação de temperatura em um encapsulamento *Power Quad Flat No-Lead* (PQFN) [18] devido a potência dissipada por MOSFET de potência, alternando a sua montagem interna dentre as opções *Standard*, *Standard with Thermally Enhanced Leadframe* (STEL), *Exposed Pad* (EPad) e *Exposed Pad* com *heavy gauges* de alumínio, utilizando-se simulação por método dos elementos finitos.
- O estudo da variação de temperatura no interior de um encapsulamento devido a alteração do tempo de chaveamento do MOSFET de potência, utilizando-se simulação por método dos elementos finitos.

Para atingir os objetivos é necessário ter conhecimento dos mecanismos de transmissão de calor

responsáveis pela condução do calor produzido no interior do encapsulamento para o ambiente. Também é necessário conhecer o dispositivo que irá dissipar o calor, no caso deste trabalho é um MOSFET de potência. Por último, deve-se saber explorar as funcionalidades do programa FEM escolhido para se realizar as simulações, no caso deste trabalho é o programa *COMSOL Multiphysics*. Somente após ter preenchido estes pré-requisitos se iniciam as simulações.

Primeiramente será simulado o encapsulamento PQFN com as montagens internas *Standard*, *Standard with Thermally Enhanced Leadframe*(STEL) e *Exposed Pad*(EPad), estes modelos serão simulados com as mesmas curvas de corrente e tensão de carga e sob mesmas condições. A partir do resultado será analisado como cada montagem interna afetou o aquecimento do encapsulamento e quais as temperaturas máximas atingidas, as observações realizadas serão comparadas com as da referência [9]. A seguir, o mesmo encapsulamento PQFN será simulado com a montagem interna *Exposed Pad* com *heavy gauges*, esta montagem interna é utilizada em aplicações onde se têm altos valores de potência dissipada. Os resultados obtidos serão comparados com os das demais montagens. Por último será realizada a simulação do encapsulamento PQFN com montagem interna *Exposed Pad* com *heavy gauges* variando tempo de chaveamento da curvas de corrente e tensão da carga, nos resultados será analisado como o tempo de chaveamento afeta a temperatura no interior do encapsulamento.

Capítulo 2

Considerações Teóricas

Neste capítulo são tratados o comportamento do transistor MOSFET e suas perdas, os mecanismos de transferência de calor e a metodologia do programa utilizado para realizar as simulações do trabalho.

Na primeira seção é apresentado o funcionamento do transistor MOSFET, enfatizando sua aplicação em eletrônica de potência e os motivos das perdas existentes no transistor. Na segunda seção são descritos os fenômenos de transferência de calor mais relevantes para a análise térmica de um dispositivo de estado sólido, sendo eles: condução e convecção. Por último, é apresentado o programa utilizado para a realização das simulações presentes neste trabalho.

2.1 Transistor MOSFET

Dentre todos os dispositivos de estado sólido, o mais importante é o transistor. Sua invenção teve um impacto sem precedentes na indústria eletrônica e na pesquisa de dispositivos de estado sólido.

Em aplicações digitais o transistor é comparável a uma chave mecânica. Entretanto, apesar de atuarem de maneira semelhante, o transistor tem enorme vantagem em relação as chaves mecânicas. Transistores são muito rápidos (seu tempo de chaveamento pode ser da ordem de picosegundos), podem ser produzidos em larga escala (milhões em um chip de 1cm^2), são pequenos (0,1 micro-

metro ou menos) e são muito baratos. Em consequência de todas essas vantagens, os transistores são muito utilizados em circuitos analógicos e digitais. [19]

O transistor MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) é o dispositivo de estado sólido mais importante para circuitos de alta densidade, como microprocessadores e memórias, e está tornando-se um importante dispositivo de potência. Sua importância deve-se as seguintes características: [20]

- Alta impedância de entrada, facilitando a sua associação a sistemas de microondas,
- Coeficiente de temperatura negativo para altos valores de corrente, ou seja, a corrente diminui com o aumento da temperatura. Devido a esta característica é observada uma distribuição de temperatura mais uniforme no dispositivo,
- Alta velocidade de chaveamento, pois não sofre com o acúmulo de portadores minoritários.

Fisicamente, um MOSFET é um capacitor MOS com duas junções PN localizadas nas adjacências da região do semiconductor controlado pela porta MOS. O substrato de silício pode ser tipo-p (como na figura 2.1) ou tipo-n.

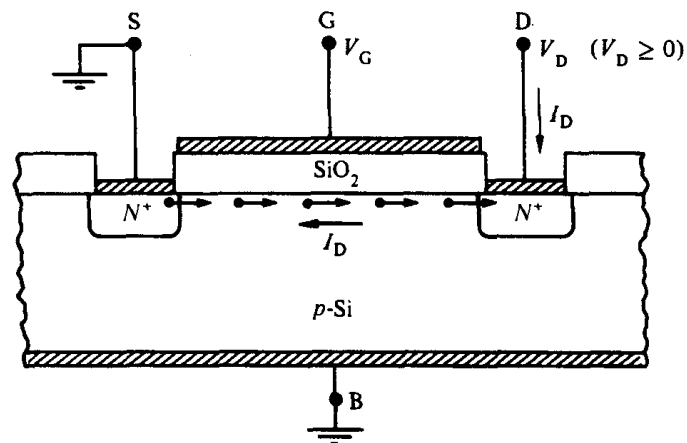


Fig. 2.1: Seção transversal de um MOSFET canal n, mostrando os terminais e a direção dos portadores e do fluxo de corrente.[4]

A aplicação de uma tensão positiva no terminal da porta (*gate*) do transistor, V_G , cria uma diferença de potencial entre a porta e o corpo (*bulk*) do transistor. Quando a diferença de potencial

entre os terminais da porta e corpo, V_{GB} , for maior que a tensão de threshold (V_T), será formada uma camada fina próximo da interface entre substrato e óxido. Será observado na mesma, uma grande concentração de portadores de carga negativas (no caso de um substrato tipo p), essa região é conhecida como camada de inversão ou canal de condução.

Um MOSFET tipo-p possui suas regiões de fonte e dreno tipo-n, ou seja dopadas com doadores. Entre essas regiões, quando submetidas a uma diferença de potencial, haverá um fluxo de elétrons na camada de inversão, a corrente de dreno.

Na figura 2.2 pode ser visto qual é a influência das tensões V_G e V_D na corrente de dreno. Para os casos onde $V_G < V_T$, o canal de condução não é criado e por este motivo $I_D = 0$. Nos casos onde $V_G > V_T$, o aumento de V_G irá exigir um maior valor de V_D para que a corrente de dreno sature (pinch-off do canal de condução). [4]

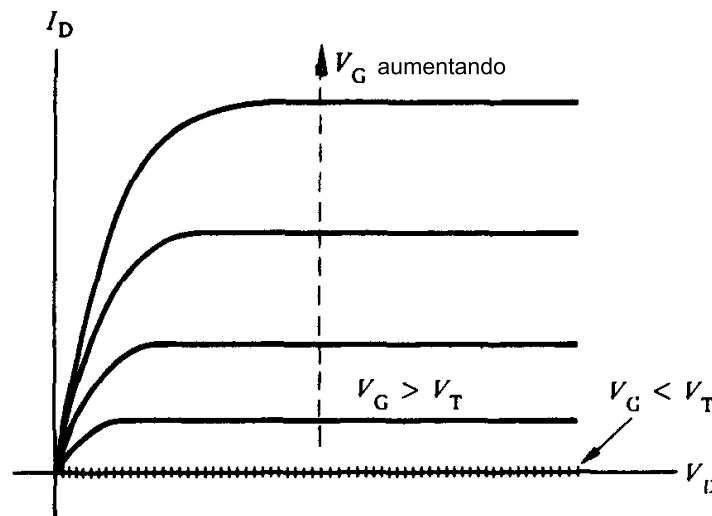


Fig. 2.2: Curvas $I_D \times V_D$ para um MOSFET.[4]

Nas curvas $I_D \times V_D$ podem ser observados os três modos de operação do transistor,

- Modo de Corte: Ocorre quando $V_{GB} < V_T$. Neste modo de operação não existe corrente entre dreno e fonte.
- Modo de Triodo: Ocorre quando $V_{GB} > V_T$ e $V_{DS} < (V_{GB} - V_T)$. Neste modo de operação a corrente entre dreno e fonte aumenta proporcionalmente ao aumento da tensão entre dreno

e fonte. A variação da corrente do transistor neste modo é descrita pela equação:

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left((V_{GB} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right). \quad (2.1)$$

- **Modo de Saturação:** Ocorre quando $V_{GB} > V_T$ e $V_{DS} > (V_{GB} - V_T)$. Neste modo de operação a dependência entre a corrente e a tensão nos terminais de dreno e fonte torna-se mínima, ou seja, o valor da corrente se mantém aproximadamente constante com o aumento da tensão. A variação da corrente do transistor neste modo é descrita pela equação:

$$I_D = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_{GB} - V_T)^2. \quad (2.2)$$

2.1.1 Transistor MOSFET de Potência

MOSFETs de potência são transistores específicos para operar com altos níveis de potência. Os primeiros modelos surgiram na metade da década de 70 para substituir os transistores bipolares, pois estes possuem um ganho de corrente baixo para altas tensões, não conseguem operar a altas frequências e podem ocorrer falhas destrutivas quando sujeitos a um chaveamento intenso com cargas indutivas.

Ao substituir dispositivos bipolares por MOSFETs, é possível simplificar o circuito de controle *drive circuit* devido a alta impedância de entrada e são abertas novas possibilidades de aplicações operando em frequências de 10 à 50 kHz devido a alta velocidade de chaveamento.[5]

Atualmente, MOSFETs de potência são utilizados em dispositivos de chaveamento que operam em tensões abaixo de 200 V, alguns exemplos são mostrados na figura 2.3.

O MOSFET de potência possui estrutura vertical, apropriada para operar com altos valores de tensão e corrente. Na estrutura planar deve-se intercalar os eletrodos do dreno e da fonte, forçando a utilização de eletrodos de metal com diâmetros muito pequenos que possuem baixa capacidade de conduzir corrente. Esta limitação não existe na estrutura vertical, permitindo a utilização de eletrodos de dreno e fonte com diâmetros maiores, aumentando a capacidade de condução de corrente.

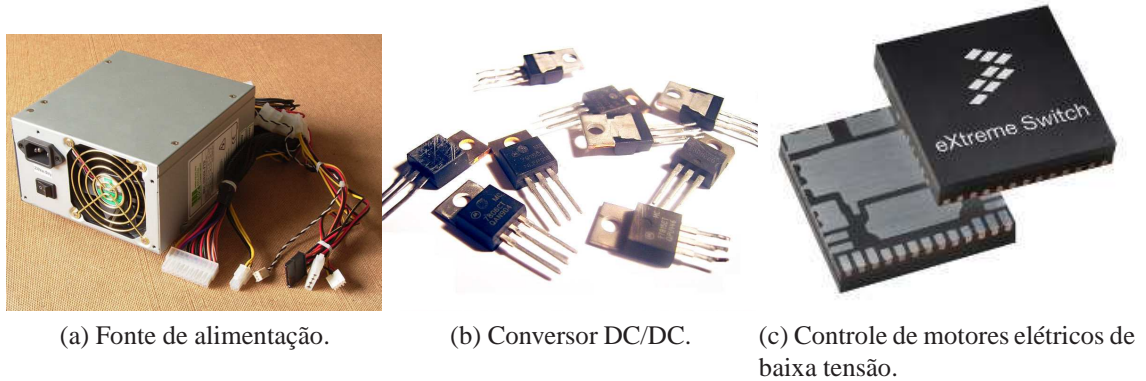


Fig. 2.3: Aplicações para o transistor MOSFET de potência.

Outra vantagem da montagem vertical é ter sua tensão de ruptura dependente da concentração de dopantes e da espessura da região de deriva N e sua corrente dependente da espessura do canal, permitindo que o transistor possua uma alta tensão de bloqueio juntamente com uma alta corrente.

O grande ponto fraco do MOSFET de potência é que sua potência de operação é limitada pela resistência interna entre os eletrodos de dreno e fonte. A potência dissipada, devido a queda de tensão nesta resistência, limita a corrente máxima de operação do MOSFET de potência. Além disso, o circuito que emprega o dispositivo também é afetado, perdendo eficiência. Para reduzir a resistência interna do MOSFET de potência foram desenvolvidas novas estruturas verticais, sendo as principais: V-MOSFET, VD-MOSFET e U-MOSFET.[5]

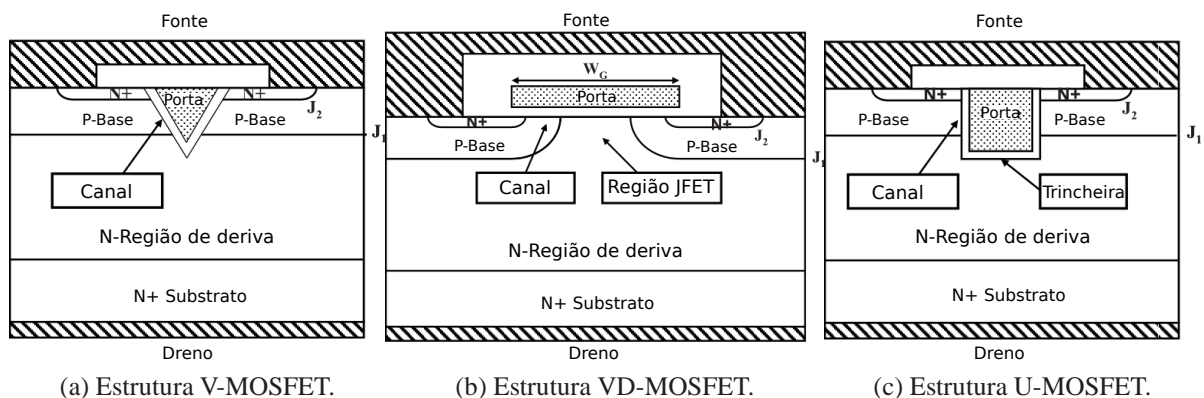


Fig. 2.4: Estruturas verticais de um MOSFET de potência.[5]

V-MOSFET

O primeiro MOSFET de potência foi desenvolvido nos anos 70 utilizando o processo de *etching V-groove*, ver figura 2.4a. O *V-groove* é formado na superfície superior e penetra as camadas $N+$ e P , rompendo as junções $J1$ e $J2$ e atinge a camada de deriva N . No interior do *V-groove* será colocado o eletrodo de porta, por este motivo o óxido de porta é criado em sua superfície interna. O transistor bipolar parasita presente nesta região é suprimido quando o eletrodo de porta penetra na junção $J2$ e à curto-circuita.

O canal para a condução de corrente entre dreno e fonte será formado na superfície da região P abaixo do óxido de porta. Pois, ao se aplicar tensão na porta os elétrons serão atraídos para a interface entre óxido e semiconductor, o acumulo de elétrons na região da base P irá formar um caminho para a condução de corrente.

Quando não há tensão aplicada na porta e a tensão aplicada ao dreno é positiva, o dispositivo suporta altos valores de tensão. A tensão máxima suportada será determinada pela concentração dos dopantes e espessura da região de deriva N . Ao escolher estes fatores de maneira adequada a tensão de ruptura será semelhante a de um diodo P-N. E a corrente máxima será determinada pela resistência interna da estrutura. Ao reduzir a resistência aumentaremos a densidade de elétrons no canal e capacidade de corrente.

A estrutura V-MOSFET perdeu espaço devido as dificuldades de fabricação. O processo de *etching* para a criação do *V-groove* era a base de hidróxido de potássio, que possui taxas de *etch* diferentes para cada orientação do silício. Também foi descoberto que o potássio contamina o óxido de porta, provocando instabilidades durante operações de longa duração. Além disso, a ponta do *V-groove* se mostrou prejudicial à tensão de ruptura.

VD-MOSFET

A figura 2.4b mostra o *vertical diffused* MOSFET, VD-MOSFET. Sua estrutura é composta de uma camada N epitaxial crescida sobre uma uma camada $N+$ altamente dopada. Duas regiões de fonte P e $N+$, localizadas lateralmente a porta, são produzidas por difusão.

Quando não está sendo aplicada tensão na porta e aplica-se uma tensão positiva ao dreno, o VD-MOSFET suporta altos valores de tensão. Sendo o valor de tensão proporcional a espessura da camada de deriva N . Ao aplicar tensão na porta é criada uma camada de inversão na superfície da região P abaixo do eletrodo de porta. O surgimento da camada de inversão permite que os elétrons se desloquem entre as regiões de dreno e fonte, criando a corrente de dreno.

Entre as áreas P da porta existe uma região JFET, que recebe os elétrons vindos da camada de inversão. Por ser estreita, esta região aumenta a resistência interna da estrutura. Este problema pode ser minimizado alterando-se outros fatores que influenciam a resistência interna, como a largura da porta e a dopagem na região JFET.

Após sair da estreita região JFET os elétrons entrarão na região de deriva N abaixo da junção $J1$, espalhando-se por toda a região. Consequentemente, a distribuição de corrente na região de deriva N não será uniforme, fazendo com que a resistência interna da estrutura seja maior que seu valor ideal.

O VD-MOSFET possui uma resistência interna muito elevada, o que motivou o desenvolvimento de novos dispositivos buscando uma menor resistência interna.

U-MOSFET

No fim dos anos 80, foi desenvolvida a tecnologia para a gravação de trincheiras para construção de capacitores em chips DRAM. O processo foi adaptado pela indústria de semicondutores de potencia para o desenvolvimento do U-MOSFET, mostrado na figura 2.4c. No U-MOSFET a trincheira se estende da superfície superior da estrutura até sua região de deriva N , passando pelas regiões da fonte $N+$ e P . Na superfície interna da trincheira é formado o óxido de porta e dentro dela é colocado a porta do dispositivo.

O U-MOSFET suporta altos valores de tensão quando não existe tensão na porta e a tensão no dreno é positiva. Sendo o valor de tensão proporcional a espessura da camada $N-$. Nesta situação, pelo fato do potencial da porta estar em zero, são observados altos valores de campo elétrico através do óxido de porta. Para evitar problemas devido aos campos elétricos do óxido nas

quinas da trincheira, é usual arredondar o fundo da trincheira.

Quando é aplicada uma tensão positiva na porta surge uma camada de inversão na região P próxima a lateral da trincheira, por onde os elétrons irão se deslocar em direção ao dreno. Após passar pelo canal os elétrons atingirão a região de deriva N abaixo da trincheira. Portanto, não existe região JFET nesta estrutura, o que reduz consideravelmente a resistência interna do U-MOSFET em comparação com o VD-MOSFET.

2.1.2 Chaveamento do MOSFET de potência

Nos circuitos eletrônicos de potência os dispositivos semicondutores, geralmente são utilizados em operações de chaveamento. A necessidade destes dispositivos deve-se a sua capacidade de alimentar cargas de alta potência, mas com perdas relativamente baixa. O resultado desta combinação é o aumento da eficiência do circuito. Dentre os dispositivos semicondutores existentes no mercado, o mais importante, por motivos citados na seção 2.1.1, é o transistor MOSFET de potência.

As perdas de um transistor não são importantes apenas para avaliar a sua eficiência, mas também para calcular o aquecimento que o dispositivo irá sofrer. Pois a energia perdida será dissipada através de calor, aquecendo o transistor. Para calcular a potência dissipada utiliza-se a equação:

$$P(t) = i_{sw} \cdot v_{sw}, \quad (2.3)$$

onde $P(t)$ é a potência dissipada no tempo t , i_{sw} é a corrente que percorre o transistor e v_{sw} é a queda de tensão entre os terminais do transistor. Na figura 2.5 pode ser visto a forma gráfica obtida ao utilizar-se a equação 2.3.

As perdas existentes em um transistor são divididas em duas classes, mostradas na figura 2.5, perda por condução e perda por chaveamento.

A perda por condução ocorre durante os estágios ligado (*on-state*), quando se tem um valor constante de corrente sendo conduzido, e desligado (*off-state*), quando o transistor idealmente não

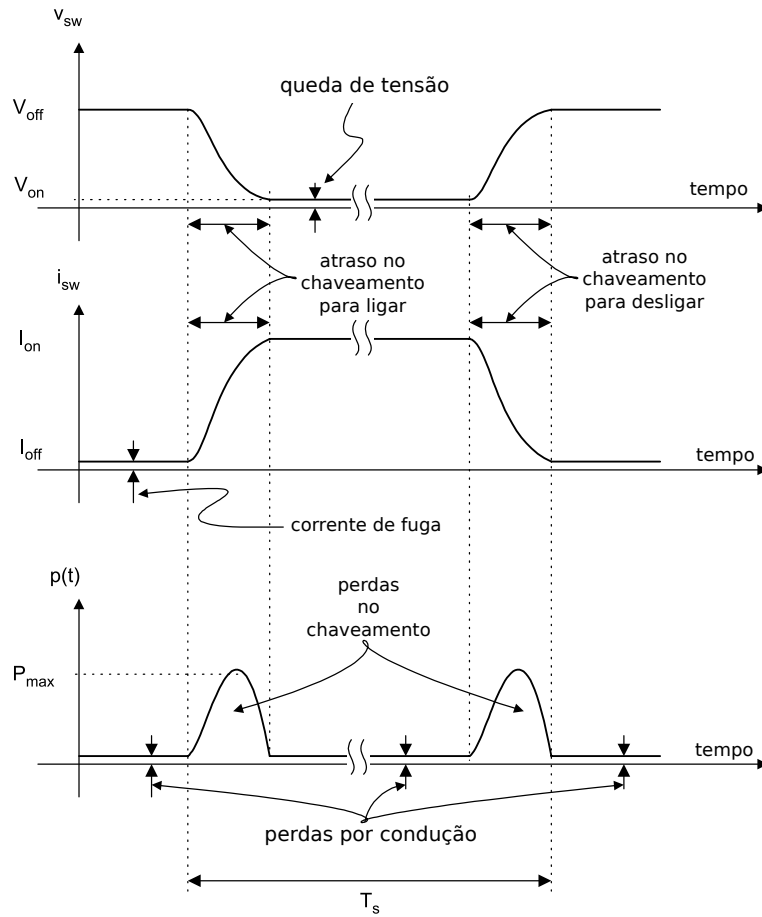


Fig. 2.5: Queda de tensão, corrente e perda de potência em um transistor.[6]

conduz corrente. Durante o estado desligado, continua havendo perdas por condução devido a corrente de fuga (*leakage*) existente. Essas correntes percorrem as resistências parasitas do transistor, mostradas na figura 2.6, onde ocorrem as perdas por efeito Joule.

Na figura 2.6, observa-se que a resistência entre dreno e fonte é composta de varias resistências parasitas. Uma vez que estas resistências estão associadas em série, basta somá-las para se obter o valor total da resistência interna entre dreno e fonte. Como é mostrado na equação:

$$R_{DS} = R_{CS} + R_{N+} + R_{CH} + R_A + R_D + R_{SUB} + R_{CD}, \quad (2.4)$$

sendo R_{DS} a resistência total entre dreno e fonte, R_{CS} a resistência de contato da fonte, R_{N+} a resistência da região $N+$, R_{CH} a resistência do canal, R_A a resistência da região de acumulação,

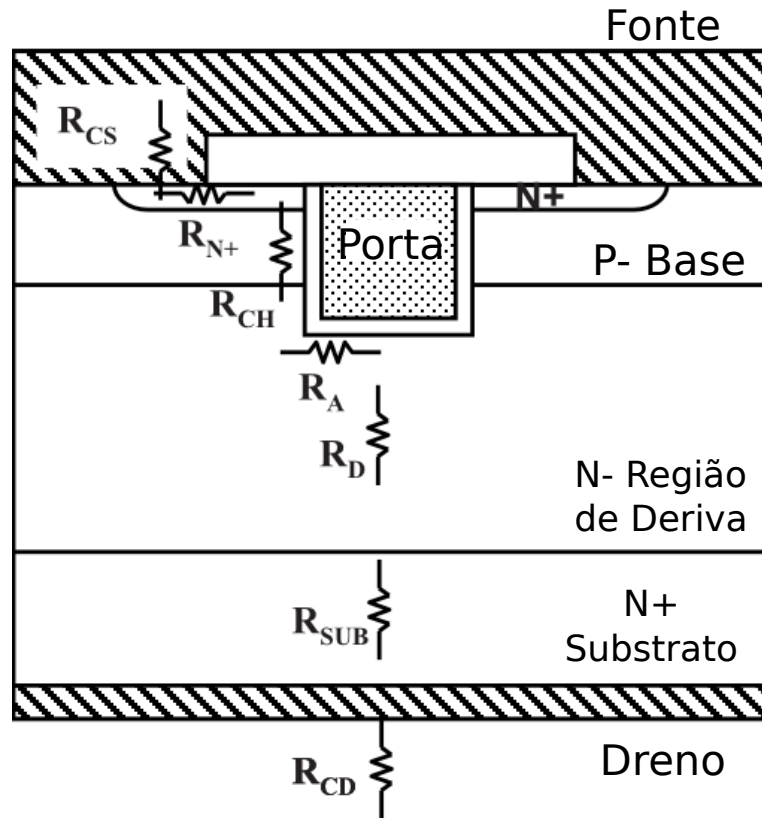


Fig. 2.6: Resistências parasitas de um U-MOSFET.[5]

R_D a resistência da região de deriva N , R_{SUB} a resistência do substrato $N+$ e R_{CD} a resistência do contato de dreno.

Diferente das perdas por chaveamento, as perdas por condução não dependem da frequência na qual o dispositivo opera, sua dependência é com o ciclo de trabalho (*duty-cycle*). O ciclo de trabalho é a porcentagem do período em que o transistor está em seu estado ligado. A dependência com o ciclo de trabalho é decorrente da diferença entre as correntes presentes no transistor em cada estado, a corrente no estado ligado é muito maior que a corrente de fuga do estado desligado. Sendo assim, quanto maior for o tempo em que o transistor se encontra no estado ligado, maior serão as perdas por condução.

A perda por chaveamento é a potência dissipada pelo transistor durante sua transição do estado desligado para o ligado e vice-versa. Quanto maior é a frequência de operação, maior será o número de transições realizadas por segundo. Portanto, a perda total durante os chaveamentos é

proporcional a frequência de operação.

Esta perda ocorre devido a variação simultânea dos valores de corrente e tensão durante o chaveamento do transistor, como pode ser visto na figura 2.5.

Em um transistor ideal, onde o tempo de chaveamento é zero, essa perda não ocorre. Mas transistores reais possuem capacitâncias parasitas, que serão carregadas e descarregadas durante o chaveamento, fazendo com que o tempo de chaveamento seja diferente de zero. Portanto, ao se reduzir as capacitâncias, se reduz o tempo de chaveamento e as perdas por chaveamento.

Na figura 2.7 são mostradas as capacitâncias parasitas de um U-MOSFET.

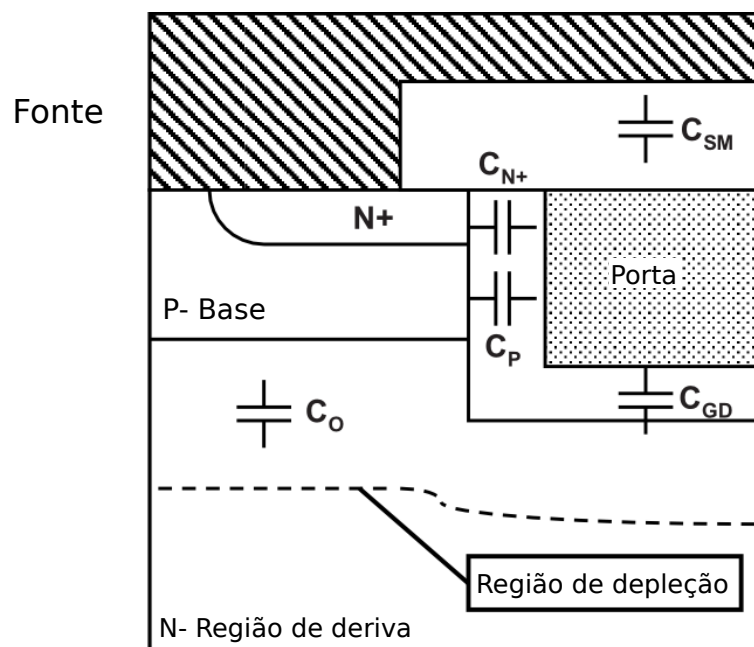


Fig. 2.7: Capacitâncias parasitas de um U-MOSFET.[5]

2.2 Transmissão de calor

Transmissão de calor é a ciência que estuda a transferência de energia, resultante da diferença de temperatura, que pode ocorrer no interior de um meio físico ou entre dois meios físicos diferentes. Segundo a termodinâmica, energia em trânsito é definida como calor. Ele não pode ser observado e nem medido, mas os seus efeitos no meio físico podem ser medidos e observados. A ciência da

transferência de calor não visa apenas explicar com o calor é transferido, mas também determinar a taxa de transmissão nas condições determinadas. [21, 22]

Diferentemente da transmissão de calor, a termodinâmica trabalha com sistemas em equilíbrio. Podendo ser usada para calcular a quantidade de energia necessária para que o sistema saia de um equilíbrio para outro. Entretanto, a termodinâmica não é capaz de prever a velocidade com que a mudança de equilíbrio ocorrerá, pois durante a mudança o sistema não estará mais em equilíbrio. A termodinâmica é governada por dois princípios:

- A energia pode ter a sua forma modificada e pode ser transferida entre sistemas, mas não pode ser criada ou destruída. Esta afirmação é conhecida como a primeira lei da termodinâmica, representada pela seguinte equação:

$$\Delta U = W + Q, \quad (2.5)$$

onde ΔU é a variação energia interna, W é o trabalho realizado e Q é o calor produzido.[23]

- Nenhum processo é possível onde o único resultado é a absorção de calor de um reservatório e sua conversão completa em trabalho. Este princípio, postulado por Lorde Kelvin, é conhecido como a segunda lei da termodinâmica. [23]

Na grande maioria dos problemas de engenharia não é suficiente conhecer apenas a quantidade de calor transmitida, é necessário e de grande importância conhecer a taxa na qual o calor é transmitido, nas circunstâncias determinadas pelo problema. Portanto, se faz necessário utilizar as leis da termodinâmica em conjunto com os conceitos e equações de transmissão de calor.

Ao se modelar um problema deve-se determinar as condições iniciais e aproximações, uma vez que é quase impossível descrever exatamente os fenômenos físicos sendo que em alguns casos uma aproximação pode reduzir sensivelmente os cálculos sem gerar um erro significativo no resultado final.

Existem três mecanismos de transmissão de calor: condução, convecção e radiação. Em problemas reais, muitas vezes há atuação de mais de um mecanismo simultaneamente, mas ao se

modelar os problemas, para simplificarmos os cálculos, usualmente os mecanismos que tem pouca influência no resultado final são descartados.[7, 22, 24]

2.2.1 Condução

A transmissão de calor através de meios sólidos opacos e homogêneos ocorrem por condução, originada pela diferença de temperatura existente entre a região quente e a região fria. No casos dos meios sólidos a transmissão ocorrerá por duas maneiras:

- **Vibração molecular:** A vibração molecular é o mecanismo responsável pela transmissão de calor em materiais dielétricos e semicondutores. A energia de vibração das moléculas é medida através de uma unidade discreta chamada fônons, que podem ser vistos como pacotes de energia deslocando-se dentro do material. Sendo que seu deslocamento ocorre no sentido da região de maior temperatura para a região de menor temperatura.
- **Difusão de elétrons livres:** O transporte por difusão de elétrons livres é o mecanismo responsável pela transmissão de calor em metais e ligas metálicas. Tais materiais possuem grande quantidade de elétrons livres, aptos à conduzir uma grande quantidade de energia térmica. Os elétrons se deslocarão por difusão da região mais quente para a região mais fria. Nestes casos são utilizados conceitos de circuitos elétricos no estudo do fluxo de calor.

O transporte por difusão de elétrons livres é mais eficiente que por vibração molecular, portanto a quantidade de elétrons livres em um material determinará a sua capacidade de transmissão de calor por condução.

Em líquidos e gases também ocorre transmissão de calor por condução, nesses casos a transmissão de calor também estará associada a convecção e radiação.

A relação básica para a transmissão de calor por condução, chamada de lei de Fourier, foi proposta pelo físico-matemático francês J. B. J. Fourier, em 1822. Segundo essa relação, o fluxo

de calor transmitido, q_n , em uma direção n é descrito pela equação:

$$q_n = -k_n A \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (2.6)$$

sendo k_n a condutividade térmica do material na direção n , A a seção transversal através da qual passa o fluxo de calor e $\frac{\partial T}{\partial n}$ o gradiente de temperatura na direção n . O sinal negativo na equação é adotado devido a uma convenção, com o intuito de mostrar que o calor fluirá do ponto de maior temperatura para o ponto de menor temperatura, desta maneira, respeitando a segunda lei da termodinâmica.

A condutividade térmica do material, k , é uma propriedade termofísica do material, materiais com alta condutividade térmica são chamados condutores e materiais com baixa condutividade térmica são chamados isolantes. Vários fatores podem afetar o valor da condutividade térmica, mas os de maior influência são temperatura (ver figura 2.8), pureza do material e a direção do gradiente de temperatura. No caso de materiais isotrópicos, o valor de k é o mesmo em todas as direções, mas para materiais anisotrópicos, como madeira e materiais laminados, o valor de k é significativamente maior no sentido paralelo as lâminas do que perpendicular a elas. [7, 24]

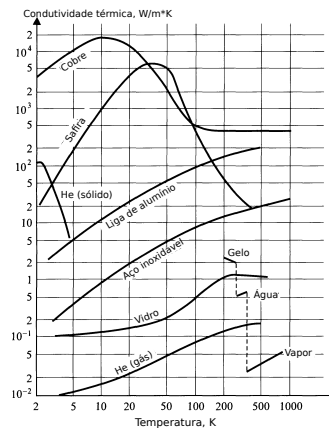


Fig. 2.8: Curvas mostrando a variação da condutividade térmica com o aumento da temperatura.

A lei de Fourier é eficiente na descrição de sistemas unidimensionais e estacionários. Mas em sistemas variantes no tempo e tridimensionais a resolução do problema é mais complexa, sendo necessário outra abordagem.

Considerando um caso geral, onde a temperatura pode variar com o tempo e o corpo pode ser uma fonte de calor. Para um elemento de espessura dx , considerando a primeira lei da termodinâmica, o balanço de energia é o seguinte:

$$\begin{aligned} \text{Energia térmica na face esquerda} + \text{Energia térmica gerada no elemento} = \\ \text{Variação na energia interna} + \text{Energia térmica na face direita} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Sendo as energias dadas pelas seguintes equações:

$$\text{Energia térmica na face esquerda} = q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.8)$$

$$\text{Energia térmica gerada no elemento} = q_{ger} = \dot{q}Adx, \quad (2.9)$$

$$\text{Variação na energia interna} = \rho CA \frac{\partial T}{\partial t} dx, \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \text{Energia térmica na face direita} &= q_{x+dx} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x+dx} \\ &= -A \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right]. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Onde \dot{q} é a energia gerada por unidade de volume, (W/m^3) , C é o calor específico do material, $J/(kg \cdot K)$ e ρ é a densidade do material, kg/m^3 .

Combinando as equações acima, obtemos:

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q}Adx = \rho CA \frac{\partial T}{\partial t} dx - A \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] \Rightarrow \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.13)$$

A equação 2.13 é a equação de condução de calor unidimensional. Para resolver problemas com um fluxo de calor em mais de uma dimensão, deve-se considerar o calor conduzido em todas

as direções. O balanço de energia será:

$$q_x + q_y + q_z + q_{ger} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \frac{dE_{int}}{dt}, \quad (2.14)$$

onde E_{int} é a energia interna do corpo. As energias serão dadas pelas seguintes equações:

$$q_x = -k dydz \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.15)$$

$$q_{x+dx} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dydz, \quad (2.16)$$

$$q_y = -k dxdz \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2.17)$$

$$q_{y+dy} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) dy \right] dxdz, \quad (2.18)$$

$$q_z = -k dxdy \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2.19)$$

$$q_{z+dz} = - \left[k \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \right] dxdy, \quad (2.20)$$

$$q_{ger} = \dot{q} dxdydz, \quad (2.21)$$

$$\frac{dE_{int}}{dt} = \rho C dxdydz. \quad (2.22)$$

A equação de condução de calor tridimensional é obtida ao substituir as equações das energias na equação do balanço de energia, resultando nas seguintes equações:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \Rightarrow \quad (2.23)$$

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.24)$$

A equação 2.24 é o modo mais geral da equação de condução de calor. Podendo ser utilizada para determinar a temperatura em cada ponto de um corpo, esta equação é importante para resolução de problemas de transmissão de calor por condução.

Analogia com circuitos elétricos

Nos casos de geometrias compostas por camadas com diferentes materiais, pode ser utilizado o conceito de resistência térmica. Deste modo, é possível utilizar conceitos de circuitos elétricos na resolução de problemas de fluxo de calor, tabela 2.1.

Tab. 2.1: Analogia entre equações de transmissão de calor e de transmissão de eletricidade. [9]

Variável	Símbolo	Unidade	Variável	Símbolo	Unidade
Corrente	I	Amperes	Calor conduzido	q	Watts
Tensão	V	Volts	Temperatura	T	K ou °C
Resistência elétrica	R	ohms	Resistência térmica	$R_{\theta AB}$	K/W ou °C/W
Capacitância elétrica	C	Faraday	Capacitância térmica	C_{θ}	Joules/°C
$\Delta V_{AB} = IR_{AB}$			$\Delta T_{AB} = qR_{\theta AB}$		

Para obtenção da relação equivalente a lei de ohm para o domínio térmico, basta reescrever a Lei de Fourier de modo a obter os termos desejados. Na equação a seguir é considerado o caso mais simples, ou seja, o fluxo de calor através de uma parede plana.

$$q_n = -k_n A \frac{\partial T}{\partial n} \Rightarrow q = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \Rightarrow \Delta T = -q \frac{\Delta x}{Ak}, \quad (2.25)$$

onde Δx é a espessura da parede. A partir da equação 2.25 é possível obter a equação da resistência térmica para o caso de uma parede plana:

$$R_{\theta AB} = \frac{\Delta x}{Ak}. \quad (2.26)$$

A figura 2.9a mostra o fluxo de calor através de três paredes em contato entre si. Esse sistema pode ser convertido em um circuito de três resistências em série, figura 2.9b, onde as resistências são somadas afim de obter uma resistência equivalente. Com este valor de resistência equivalente e conhecendo a diferença de temperatura entre os pontos externos (pontos 1 e 4), pode-se obter a quantidade de calor que é conduzida através da parede.[21]

O mesmo princípio pode ser aplicado para a figura 2.10a, mas neste caso as resistências estarão

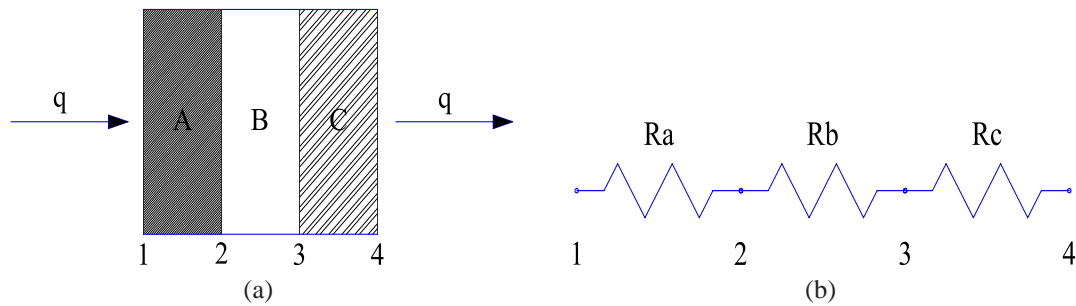


Fig. 2.9: Representação da transmissão de calor através de superfícies planas em série (a) e sua representação através de resistências térmicas (b).

em paralelo, como pode ser visto na figura 2.10b. [21]

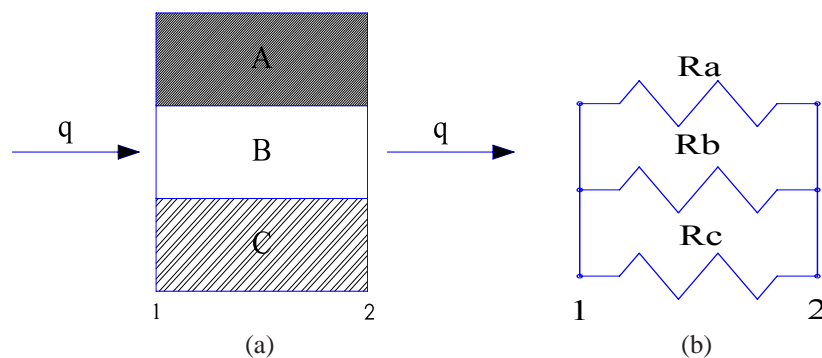


Fig. 2.10: Representação da transmissão de calor através de superfícies planas em paralelo (a) e sua representação através de resistências térmicas (b).

2.2.2 Convecção

Quando um fluido está em repouso a transferência de calor ocorre por condução onde existe um gradiente de temperatura normal à superfície do fluido ou por difusão de massa onde existe um gradiente de concentração de massa normal a superfície. No entanto, quando um fluido está em movimento, tanto massa quanto energia são transportados por gradientes de potencial e pelo próprio movimento do fluido. Esse método de transferência de calor é chamado de convecção.

Nos casos em que a movimentação do fluido é gerada devido a motivos externos, por exemplo bomba, soprador, vento e etc, o processo é denominado convecção forçada. Para os casos onde o movimento do fluido é gerado por campos de força, como a gravidade, agindo nos gradientes de densidade induzidos pela diferença de temperatura, o processo é chamado de convecção natural.

Neste caso a diferença de densidade provoca forças ascendentes no interior do fluido gerando o fluxo.

A grande diferença entre a convecção forçada e natural é o mecanismo que provoca o fluxo no fluido. Na convecção forçada, o fluxo externo é geralmente conhecido e em contrapartida, na convecção natural o fluxo é um resultado da interação entre a diferença de densidade e o campo gravitacional, estando desta maneira relacionado com a temperatura. Sendo assim, a movimentação que ocorre não é conhecida no início, tendo que ser determinada através do estudo das transferências de calor e massa que ocorrem no processo, que por sua vez está associado à mecânica de fluxo dos fluidos.

Além disso, as velocidades e diferenças de pressão também são muito menores na convecção natural em relação a forçada. Esses fatores tornam o estudo analítico e experimental da convecção natural muito mais complicado que o da convecção forçada.

Tomando como exemplo uma superfície vertical aquecida a uma temperatura uniforme, figura 2.11a. No caso da temperatura da superfície T_s ser maior que a temperatura do ambiente T_∞ , o fluido próximo a superfície vertical será aquecido, expandirá e irá subir pois ficará mais leve. O espaço deixado pelo fluido em ascensão será ocupado pelo fluido das áreas vizinhas que se deslocará, devido a diferença de pressão, gerando desta maneira um fluxo para cima.[7]

Na situação inversa, figura 2.11b, quando a temperatura da superfície T_s for menor que a temperatura do ambiente T_∞ , o fluido próximo a superfície vertical será resfriado. Consequentemente, o volume do fluido é reduzido, tornando-o mais pesado e fazendo com que se desloque para regiões mais baixas. O espaço deixado pelo fluido será ocupado pelo fluido das áreas vizinhas, gerando desta maneira um fluxo para baixo.

A transmissão de calor entre a superfície e o fluido ocorre por uma combinação de condução e transporte de massa. No caso da superfície estar a uma temperatura maior do que o fluido ao seu redor, o calor é transmitido por condução, da superfície para as partículas de fluido que estiverem mais próximas. Estas partículas que, agora, possuem maior energia serão removidas das proximidades da superfície devido ao movimento do fluido, como já foi explicado anteriormente.

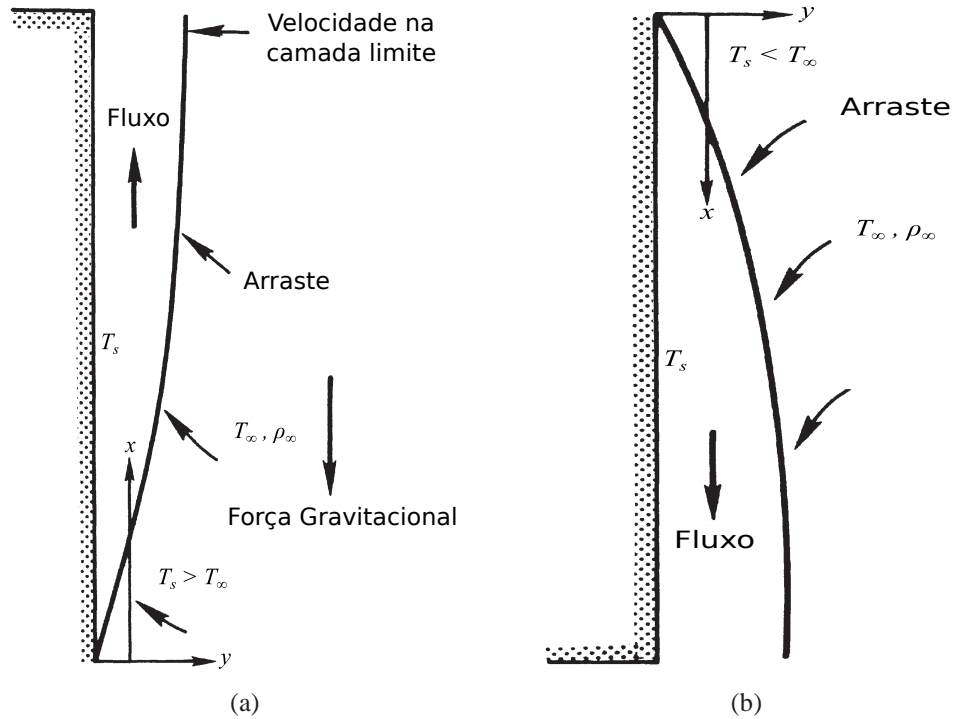


Fig. 2.11: Convecção natural sobre um superfície vertical, com temperatura da superfície maior que a temperatura do fluido (a) e com a temperatura da superfície menor que a temperatura do fluido (b). [7]

Para relacionar o calor transmitido com a diferença entre a temperatura da superfície e do ambiente é utilizada a Lei de Newton de resfriamento:

$$q = \bar{h}A(T_s - T_\infty), \quad (2.27)$$

sendo \bar{h} o coeficiente médio de transferência de calor por convecção, T_s a temperatura na superfície, T_∞ a temperatura no ambiente e A é a área da superfície vertical.

O coeficiente \bar{h} depende de vários fatores, como o mecanismo de escoamento do fluido, propriedades do fluido, da geometria do sistema e da diferença de temperatura.

Escoamento do fluido

O escoamento do fluido desenvolve-se em uma região onde existe influência das forças viscosas, essas forças são descritas em termos de uma tensão mecânica de cisalhamento $\tilde{\tau}$ entre as camadas

do fluido:

$$\tilde{\tau} = \tilde{\mu} \frac{du}{dn_{\perp}}. \quad (2.28)$$

Pela equação 2.28, pode-se observar que a tensão de cisalhamento é proporcional ao gradiente da velocidade normal, $\frac{du}{dn_{\perp}}$. Sendo n_{\perp} a direção normal a superfície de escoamento, a constante de proporcionalidade, $\tilde{\mu} (N.s/m^2)$, é chamada de viscosidade dinâmica.

O ponto inicial do escoamento é chamado borda de ataque. A partir da borda de ataque forma-se uma região de escoamento onde os efeitos de viscosidade podem ser observados, chamada de camada limite. Ela engloba toda a região contida entre a superfície aquecida e a coordenada normal à superfície na qual a velocidade do fluido é 99% da velocidade do fluido não perturbado, como é mostrado na figura 2.12. Nesta figura pode-se observar o aumento da magnitude dos vetores de velocidade até atingirem a velocidade de um fluido não perturbado, u_{∞} . O ponto onde o vetor velocidade atinge o valor de $0,99 u_{\infty}$ é o fim da camada limite e conhecendo esta coordenada pode-se obter sua altura.

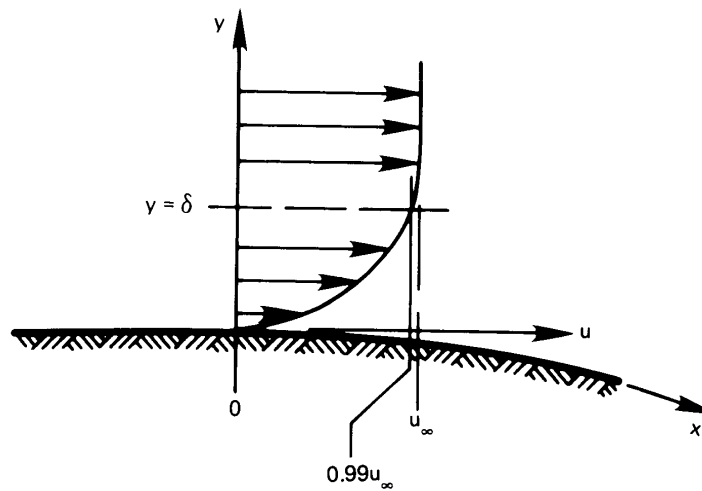


Fig. 2.12: Camada limite de altura δ . [8]

O conceito de camada limite foi introduzido pelo cientista alemão Ludwig Prandtl, em 1904, quando trabalhava na Universidade de Göttingen. A camada limite divide o campo de escoamento

ao longo do corpo em dois domínios:

- Uma camada fina que cobre toda a superfície do corpo, onde o gradiente de velocidade e as forças viscosas são grandes;
- Uma região externa onde a velocidade é quase igual a corrente livre e os efeitos da viscosidade são desprezíveis.

Este conceito permitiu a redução das equações de Navier-Stokes para uma forma na qual elas podem ser resolvidas, possibilitando desta maneira, a determinação dos efeitos da viscosidade no escoamento e o cálculo da resistência de atrito ao longo da superfície.[8]

A camada limite tem um comportamento laminar no início, perto da borda de ataque, ou seja, o fluido move-se em camadas ordenadas (lâminas) e não ocorre transição de uma camada para outra. Na borda de ataque somente as partículas em contato com a superfície são desaceleradas, enquanto o restante do fluido continua em velocidade de corrente livre não perturbada. Entretanto, com o avanço do fluido ao longo da superfície as forças de cisalhamento provocam uma maior desaceleração do fluido, aumentando assim a espessura da camada limite.

Sempre existem perturbações e ondas no escoamento de fluidos, mas enquanto as forças viscosas são grandes, o crescimento dessas perturbações são inibidos. Entretanto, com o aumento da camada limite as forças viscosas diminuem, até chegar a um ponto na qual as perturbações deixarão de ser inibidas e passaram a crescer com o tempo. Neste momento a camada limite se torna instável e começa a ocorrer uma transição do escoamento laminar para o turbulento, onde o movimento linear e em camadas dá lugar ao movimento aleatório, com turbilhões e vórtices, como pode ser visto na figura 2.13.

A transição do regime laminar para o regime turbulento ocorre a uma determinada distância da borda de ataque, chamada de comprimento crítico, cuja a especificação é feita por meio do número crítico de Reynolds. O número de Reynolds, Re_x é um número adimensional obtido através da equação:

$$Re_x = \frac{u_\infty x}{\nu}, \quad (2.29)$$

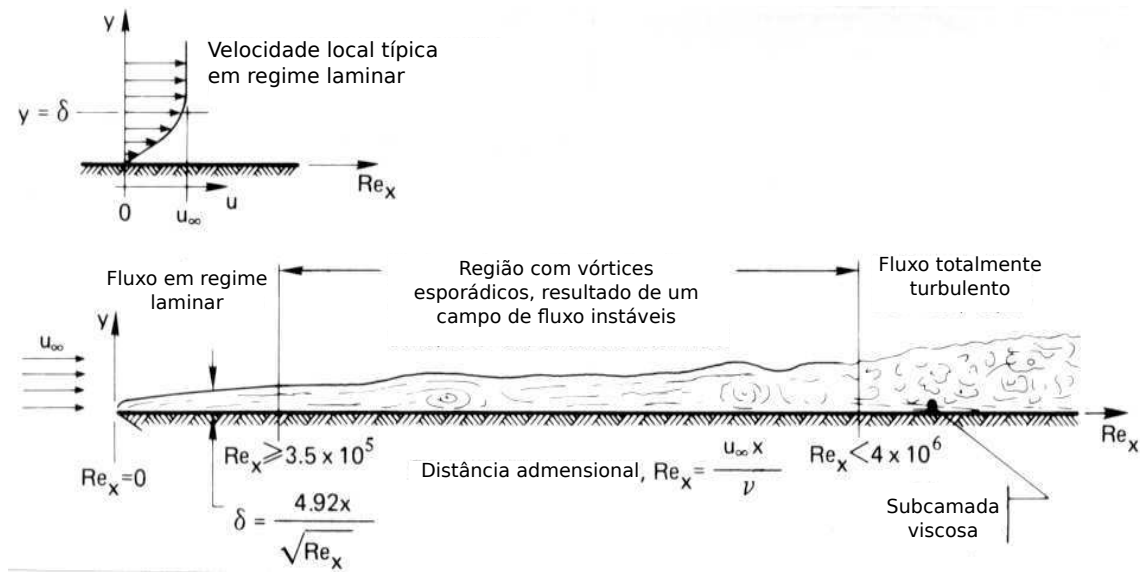


Fig. 2.13: Camada limite em uma superfície plana e longa, mostrando a variação do tipo de escoamento. [8]

sendo $\nu(m^2/s)$ a viscosidade cinemática e x a distância em metros até a borda de ataque.

Usualmente o valor de Reynolds tomado para início do escoamento turbulento é 5×10^5 , mas esse valor pode variar, uma vez que é dependente da rugosidade da superfície e do nível de turbulência da corrente livre. A faixa normal para início da transição varia de 5×10^5 a 10^6 e o fim da transição completa para escoamento turbulento ocorre, usualmente, para números de Reynolds com valores duas vezes maior ao qual teve início a transição. [8]

Número de Nusselt

Uma interpretação física para o número de Nusselt é dada como a relação entre o gradiente de temperatura no fluido imediatamente em contato com a superfície e o gradiente da temperatura de referência $(T_s - T_\infty)/L$. No caso de uma superfície plana, o coeficiente de transmissão de calor por convecção pode ser calculado utilizando o número de Nusselt através da equação 2.30,

$$\bar{h} = \overline{Nu} \frac{k_f}{L}, \quad (2.30)$$

sendo \bar{h} o coeficiente de transmissão de calor por convecção, \overline{Nu} o número de Nusselt, k_f a condutividade térmica do fluido e L o comprimento da superfície plana. É possível observar a partir da mesma equação que o coeficiente de transmissão de calor por convecção é diretamente proporcional a condutividade térmica do fluido e inversamente proporcional a dimensão característica que descreve o sistema, comprimento da placa.

Como já foi citado anteriormente, a transmissão de calor por convecção depende tanto da transmissão através de condução como do transporte de massa. Grande parte dos fluidos possui um valor baixo de condutividade térmica, por esse motivo a transferência de calor nesses meios tem grande dependência do movimento de suas partículas.

Na região de contato entre a superfície e o fluido, só existirá transmissão de calor por condução, pois as partículas do fluido estão paradas em relação a superfície, portanto pode-se definir o fluxo de calor nessa superfície através da equação:

$$q_{interface} = -k_f A \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}, \quad (2.31)$$

sendo k_f a condutividade térmica do fluido, A a área total da superfície e $\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}$ o gradiente de temperatura na superfície $y = 0$.

O calor transferido através da interface é o mesmo transferido por meio de convecção, logo, pode-se igualar a equação 2.31 com a equação 2.27, obtendo:

$$q_{interface} = -k_f A \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = \bar{h} A (T_s - T_\infty). \quad (2.32)$$

Pode-se escrever a equação 2.32 na forma adimensional, para isso é necessário inserir uma dimensão para especificar a geometria do objeto do qual o calor flui, no caso de uma superfície plana L . Também deve-se reescrever ∂T como $\partial(T - T_s)$, essa mudança não afeta a equação, uma

vez o valor do gradiente de temperatura será o mesmo para qualquer temperatura de referência.

$$-k_f A \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \bar{h} A (T_s - T_\infty) \Rightarrow \quad (2.33)$$

$$-k_f \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \bar{h} (T_s - T_\infty) \Rightarrow \quad (2.34)$$

$$\frac{-\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}}{(T_s - T_\infty)} = \frac{\bar{h}}{k_f} \Rightarrow \quad (2.35)$$

$$\frac{-\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}}{(T_s - T_\infty)} \cdot L = \frac{\bar{h}}{k_f} \cdot L \Rightarrow \quad (2.36)$$

$$\frac{-\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}}{\frac{(T_s - T_\infty)}{L}} = \frac{\bar{h} \cdot L}{k_f} \Rightarrow \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial \left(\frac{T_s - T}{T_s - T_\infty} \right)}{\partial \left(\frac{y}{L} \right)} \Big|_{y=0} = \frac{\bar{h} \cdot L}{k_f} \quad (2.38)$$

Desta maneira obtém-se a equação 2.39, que é denominada número de Nusselt, \overline{Nu} :

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} L}{k_f} = \frac{-\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}}{\frac{T_s - T_\infty}{L}} = \frac{\partial \left(\frac{T_s - T}{T_s - T_\infty} \right)}{\partial \left(\frac{y}{L} \right)} \Big|_{y=0} . \quad (2.39)$$

Camada limite térmica

Na figura 2.14 pode-se observar a distribuição de temperatura de um fluido escoando sobre uma superfície aquecida, onde o gradiente de temperatura está confinado a uma camada próxima a superfície, δ_t . A distribuição real de temperatura pode ser substituída por uma reta tangente a sua trajetória original, que irá representar uma camada hipotética de fluido de espessura, δ'_t , de mesma resistência térmica que a camada limite real contanto que esteja completamente estagnada. Neste caso teremos fluxo de calor apenas por condução e pode-se determinar o fluxo de calor por meio da equação:

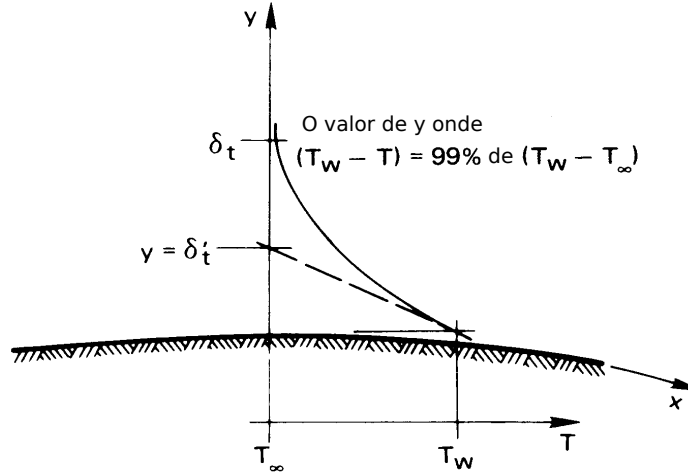


Fig. 2.14: Camada limite térmica durante o fluxo de fluido frio sobre uma placa quente. [8]

$$\frac{q}{A} = k_f \frac{T_s - T_\infty}{\delta'_t} = \bar{h}_c (T_s - T_\infty). \quad (2.40)$$

Através desta equação pode-se obter um novo método de expressar o coeficiente de transmissão de calor por convecção e consequentemente o número de Nusselt, conforme as equações 2.41 e 2.42.

$$\bar{h} = \frac{k_f}{\delta'_t}, \quad (2.41)$$

$$\overline{Nu} = \bar{h} \frac{L}{k_f} = \frac{L}{\delta'_t}. \quad (2.42)$$

Analisando um pouco mais a camada limite, pode-se observar que quanto mais fina ela for, maior será o coeficiente de transmissão de calor por convecção. Logo, quando se tem interesse em transferir calor o mais rápido possível deve-se reduzir a camada tanto quanto possível, aumentando a velocidade ou a turbulência do fluido, e quando se quer isolar a superfície deve-se buscar uma camada estagnada, com menor movimentação das partículas. [7, 8]

2.3 Programa de simulação

As simulações deste trabalho foram realizadas com o programa COMSOL Multiphysics, que utiliza o Método de Elementos Finitos (FEM) para descrever o funcionamento do modelo em estudo. O método FEM é uma técnica numérica que utiliza soluções aproximadas de equações diferenciais parciais e integrais para solucionar o problema. A solução aproximada é baseada na eliminação completa das equações diferenciais ou na conversão destas equações em um sistema aproximado de equações diferenciais ordinárias, que são integradas numericamente utilizando técnicas de cálculo numérico.

Atualmente, existe uma grande diversidade de programas que fazem uso do FEM em simulações. Tais programas são utilizados em diferentes áreas, por exemplo Mecânica, Elétrica, Eletrônica e Química, para a resolução de problemas. Empresas atuantes nestas áreas tem utilizados esses programas para desenvolver seus produtos.

Essas ferramentas de desenvolvimento são extremamente poderosas, e tem aprimorado os padrões da engenharia de projetos e a metodologia do processo de desenvolvimentos em muitas indústrias. A introdução do FEM reduziu consideravelmente o tempo que o produto leva da ideia inicial até chegar a linha de produção, pois os protótipos iniciais são desenvolvidos através do FEM, o que acelera a velocidade de testes e desenvolvimento.

Os programas que utilizam FEM podem variar com relação a sua eficiência e interface com o usuário, mas no geral o procedimento para se realizar uma simulação é o mesmo, como pode ser visto no fluxograma da figura 2.15.

2.3.1 Construção do modelo

O modelo do objeto a ser simulado é construído utilizando-se alguma ferramenta CAD (*Computer-aided design*), figura 2.16. Usualmente os programas possuem uma ferramenta para construir a geometria desejada, mas quando se trata de uma forma muito complexa, essas ferramentas deixam de ser eficientes e é necessário utilizar um programa específico para desenhar a geometria e depois

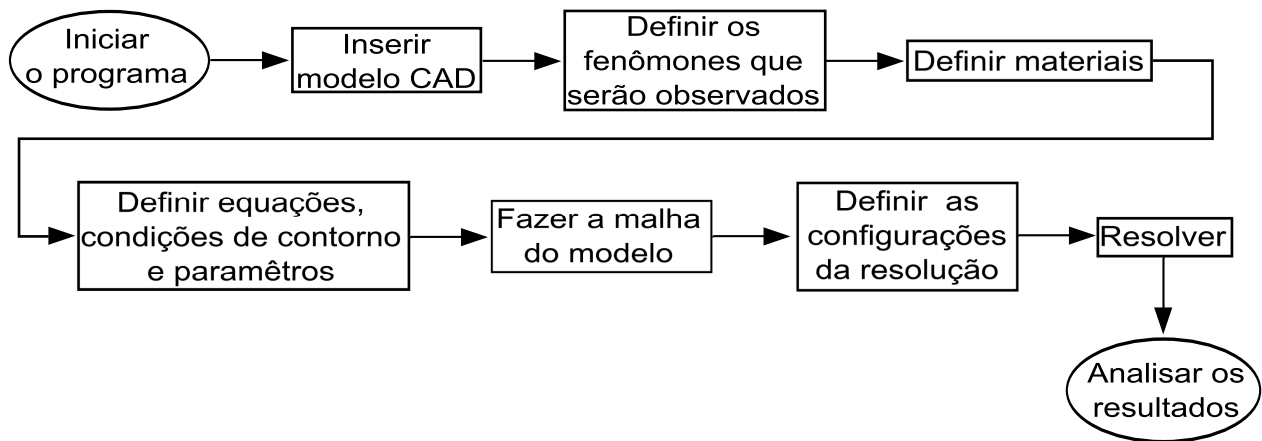


Fig. 2.15: Fluxograma das simulações.

importar o desenho.

Após ter o desenho pronto, é necessário definir os materiais que irão compor o modelo, utiliza-se para isso a biblioteca de materiais do programa. Nas bibliotecas estão disponíveis uma grande variedade de materiais, também sendo possível adicionar materiais novos.

Como foi citado anteriormente os programas de simulação baseados em FEM tem uma grande variedade de aplicações, portanto é necessário definir qual fenômeno se deseja observar e baseado na aplicação são escolhidas as equações que serão resolvidas no modelo. É possível resolver o modelo apenas considerando a sua dissipação de calor, como é o caso deste trabalho, como também é possível considerar a condução de corrente, que gera calor e que por sua vez irá dilatar o componente e ocasionar *stress*. No segundo caso, é de se esperar um gasto de processamento muito maior, pois serão resolvidas mais equações até chegar em uma resposta final.

Estas equações irão descrever o fenômeno no interior do material, mas nas fronteiras dos materiais são necessárias condições específicas. Para isso, devem ser definidas as condições de fronteira, as quais definirão como será a interação entre cada material do modelo.

2.3.2 Construção da malha

A construção da malha é de grande relevância para a solução do modelo, figura 2.17, uma vez que é a aproximação do modelo desenhado. O número de pontos presentes na malha determinará

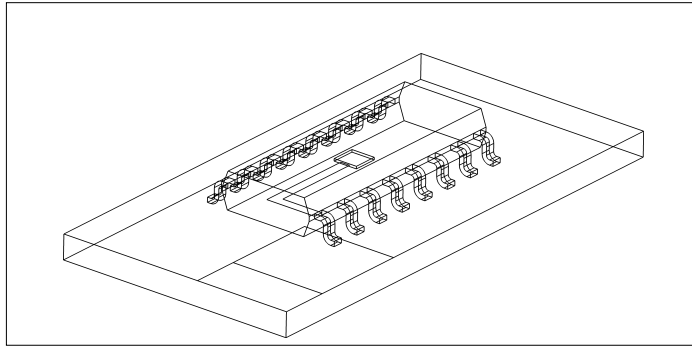


Fig. 2.16: Modelo de chip desenhado a partir de uma ferramenta CAD.

a precisão do modelo a ser simulado, ou seja, a maior quantidade de pontos na malha implicará na maior precisão do modelo.

As equações do modelo, citadas na subseção 2.3.1, serão resolvidas em cada ponto da malha obtendo-se o valor das variáveis do modelo no ponto. Nas regiões entre os pontos da malha obtém-se os valores das variáveis do modelo por meio de aproximações. Por isso a precisão o modelo é influenciada diretamente pelo número de pontos da malha. A malha pode ser:

- Tetraédrica: Formada por tetraedros para uma geometria tridimensional e triângulos para uma geometria bidimensional. As suas características são:
 - Falta de regularidade;
 - Ocasiona maior tempo de processamento e quantidade de memória utilizada;
 - Possui maior flexibilidade e versatilidade na descrição de geometrias.
- Hexaédrica: Formada por hexaedros para uma geometria tridimensional e quadriláteros para uma geometria bidimensional. As suas características são:
 - Podem ou não ser regulares;
 - Reduzem o número de elementos necessários para se construir uma geometria;
 - Sua construção pode ser complicada devido a complexidade da geometria a ser descrita.

Quando utiliza-se os dois tipos de malha em um mesmo modelo, classifica-se a malha como mista.

A utilização da malha hexaédrica é preferível na grande maioria dos casos, pois o resultado é uma malha com menor número de elementos e há a possibilidade de se criar uma malha estruturada. Em uma malha estruturada os elementos são organizados em linhas e colunas, já na malha não estruturada não existe uma relação óbvia entre os elementos vizinhos. A malha com menor número de elementos reduz o gasto de processamento e a malha estruturada permite que modelo seja dividido em blocos que podem ser simulados paralelamente. [25]

Ao fazer a malha de um modelo deve-se levar em conta qual é a precisão necessária para cada região, em alguns lugares uma malha rústica é suficiente e em outras a malha deve ser muito fina. A variação da malha é o que torna possível uma solução próxima da realidade com um gasto de processamento aceitável.

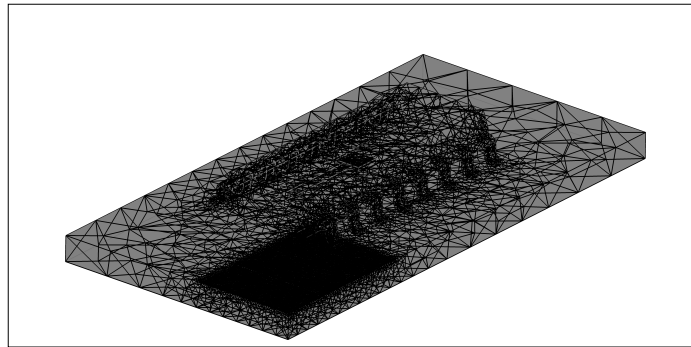


Fig. 2.17: Malha gerada para o modelo a ser simulado.

2.3.3 Simulação

O último passo é a simulação. Existem vários modos de solução que devem ser escolhidos conforme a necessidade, os modos podem ser estacionários ou variantes no tempo, podem segmentar a solução ou resolver diretamente. Além do tipo de resolução que será feito, também é possível escolher qual algoritmo será empregado para resolver o sistema linear, existem dez algoritmos possíveis de serem utilizados para a resolução do sistema linear, cinco deles utilizam soluções diretas e cinco deles soluções iterativas.

Os algoritmos diretos devem ser utilizados para modelos 1D, 2D e 3D com poucos graus de

liberdade (valores menores que 100 mil ou 1 milhão, dependendo da memória disponível.), eles requerem um menor número de ajustes e usualmente são mais rápidos que os métodos iterativos. Nestes algoritmos a resolução do sistema linear é feita através de eliminação gaussiana, sendo assim métodos estáveis e confiáveis.

Os algoritmos iterativos são recomendados para sistemas com muitos graus de liberdade (valores maiores que 100 mil ou 1 milhão, dependendo da memória disponível.), eles requisitam uma maior quantidade de memória e não são tão estáveis quanto os métodos diretos, pois em alguns casos eles não convergem. Além das configurações gerais, existem mais duas abas de configurações que podem ser utilizadas em caso de se necessitar de uma resolução mais específica.

Essa grande variedade de opções é uns dos fatores que possibilita a simulação de uma grande diversidade de modelos, obtendo resultados próximos dos observados na realidade, figura 2.18.

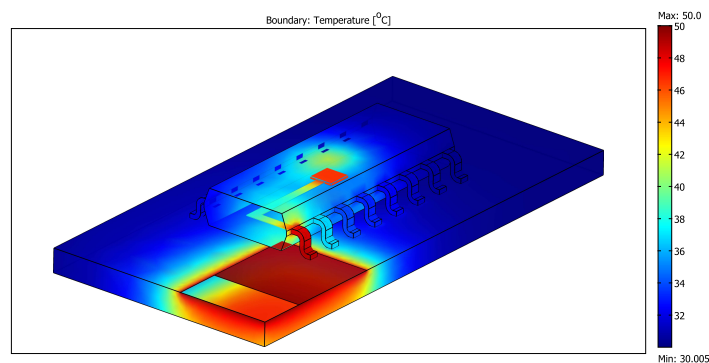


Fig. 2.18: Resultado obtido através da simulação.

Capítulo 3

Metodologia das simulações

A metodologia utilizada para a realização das simulações será apresentada neste capítulo. Foi utilizado um simulador baseado em método de elementos finitos (FEM), *COMSOL Multiphysics*, para simular o comportamento de modelos físicos. Na primeira seção são descritas as simulações do aquecimento de um encapsulamento devido ao calor dissipado por um transistor MOSFET de potência, variando-se a montagem interna do encapsulamento. A seguir, será descrita a simulação do aquecimento em um encapsulamento Power Quad Flat No-Lead (PQFN) [18] com a montagem interna *Exposed Pad* com *heavy gauges* de alumínio devido ao calor dissipado por um transistor MOSFET de potência. A última seção será dedicada às simulações relacionando o tempo de chaveamento de um transistor com o aquecimento de seu encapsulamento. Os resultados obtidos através destas simulações serão apresentados no capítulo 4.

3.1 Modelagem da simulação térmica de encapsulamento PQFN com montagens internas modificadas

As simulações apresentadas nesta seção utilizam três montagens internas diferentes: *Standard* (figura 3.1a), *Standard with thermally enhanced leadframe* (figura 3.1b) e *Exposed pad* (figura 3.1c). A escolha destas montagens deve-se ao fato de seu comportamento já ter sido estudado na

referência [9], permitindo que as observações realizadas nestas simulações possam ser comparadas com as afirmações da referência [9].

A realização destas simulações tem como objetivos, fazer uso da simulação FEM para estudar a influência da montagem interna no aquecimento dos encapsulamentos e comparar as conclusões obtidas por meio de simulação FEM com as observadas no artigo [9].

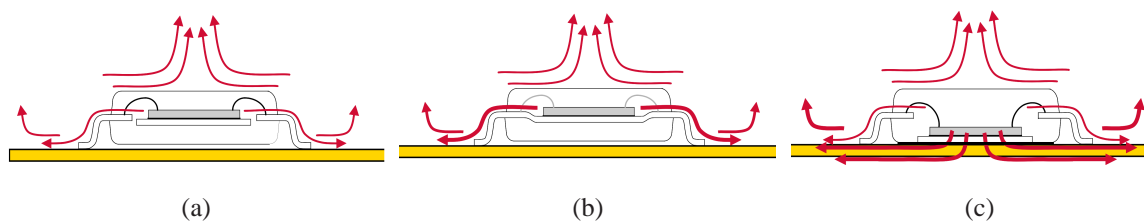


Fig. 3.1: Montagens internas Standard (a), Standard with Thermally Enhanced Leadframe (b) e Exposed Pad (c). [9]

No trabalho [9] as montagens internas estavam no interior de um encapsulamento SOIC (Small Outline IC Package). Mas neste trabalho optou-se por utilizar um encapsulamento Power Quad Flat No-Lead (PQFN), apropriado para operar com alta dissipação de potência, atualmente utilizados em automóveis, onde encapsulam chips como o *Extreme switch* [17].

Como já foi citado anteriormente na seção 2.3, a simulação é dividida em três passos, construção do modelo, construção da malha e a simulação.

3.1.1 Construção do modelo a ser simulado

Os modelos utilizados nas simulações são bidimensionais, pois reduzem a requisição de processamento necessário para se realizar a simulação. Para construir o modelo bidimensional deve-se selecionar a seção transversal que melhor representa as diferenças entre as montagens internas como referência, pois os dispositivos tem estruturas tridimensionais e não simétricas.

Primeiramente, foi desenhado um modelo bidimensional simplificado para cada montagem interna do encapsulamento utilizando um software de CAD. Dos tipos de configuração interna apresentados o *Standard*, mostrado na figura 3.2a, é o mais simples, pois não possui nenhum mecanismo

para facilitar a dissipação do calor. Já o *Standard with Enhanced Leadframe*, mostrado na figura 3.2b, possui uma ligação entre o suporte da pastilha e os condutores, que otimiza a dissipação do calor gerado. O *Exposed Pad*, mostrado na figura 3.2c, tem o suporte da pastilha diretamente ligado a PCB (*Printed Circuit Board*) gerando um caminho direto para o calor ser conduzido para fora do encapsulamento.

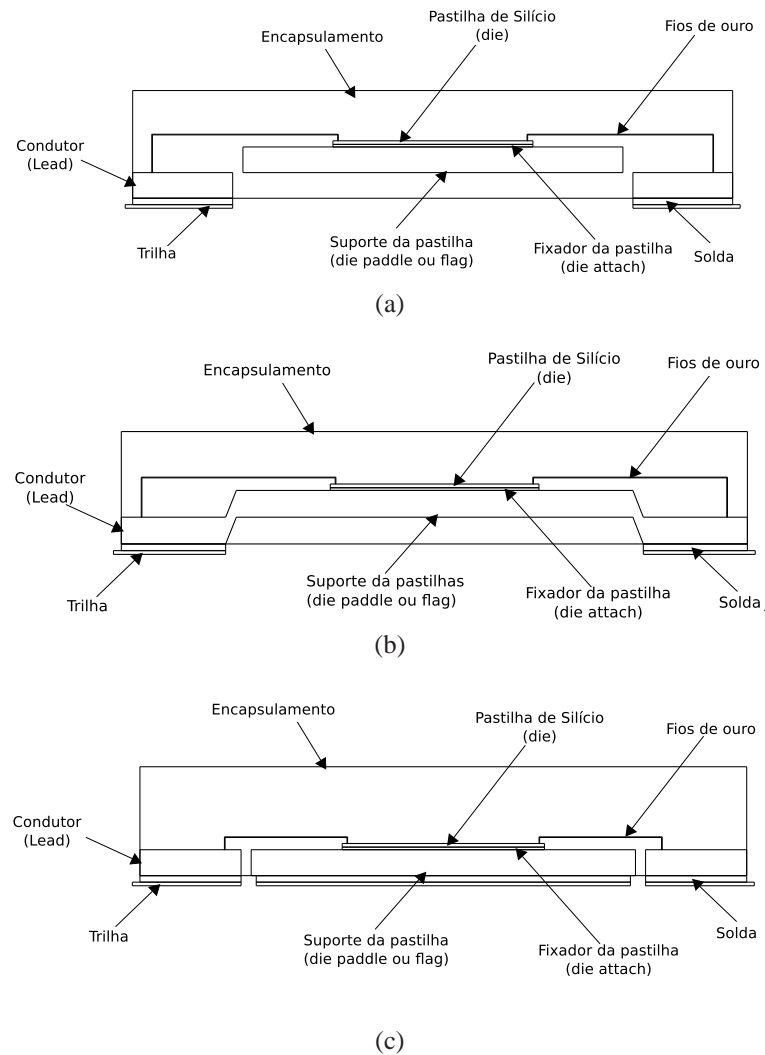


Fig. 3.2: Modelos CAD das montagens internas Standard (a), Thermally Enhanced Leadframe (b) e Exposed Pad (c).

Uma vez que as simulações demandam um grande potencial de processamento, os modelos tiveram que ser simplificados, todas as estruturas foram consideradas quadriláteros, para possibilitar a resolução do problema. Após as definições dos modelos, é necessário definir quais materiais

irão compor o modelo e quais são suas propriedades, essas informações são inseridas no programa Comsol Multiphysics através do menu “*Subdomain Settings*”, mostrada na figura 3.3. Os materiais utilizados nos modelos são mostrados na tabela 3.1. A escolha destes materiais foi baseada em artigos [9, 13, 15, 26] e em documentos técnicos de componentes eletrônicos [17, 27].

Tab. 3.1: Materiais utilizados nos modelos de encapsulamentos simulados.

Materiais	Condutividade Térmica, $k(W/(m\ K))$	Densidade, $\rho(kg/m^3)$	Capacidade Calorífica, $C_p(J/(kg * K))$
FR4	0,3	1900	1369
Cobre	400	8700	385
Solda, 60Sn-40Pb	50	9000	150
Encapsulante	0,7	1,82	0,8
Ouro	317	193000	129
Silício	130	2329	700

No mesmo menu onde são escolhidos os materiais, também é possível observar a equação através da qual será determinada a temperatura do modelo, equação 3.1. No caso desta simulação, a transmissão de calor ocorre por condução no interior do modelo e por convecção na sua superfície que está em contato com o ar, figura 3.4. A equação da transmissão de calor por condução é

$$\rho C_p \partial T / \partial t + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q + q_s T, \quad (3.1)$$

onde ρ é a densidade, C_p é a capacidade térmica e k é a condutividade térmica do material, Q é a taxa de calor dissipada por unidade de volume pelo material e q_s é o coeficiente de produção/absorção de calor do material. As equações 3.1 e 2.24 são iguais, com a diferença que a equação acima inclui o coeficiente de produção/absorção de calor. Entretanto, esse coeficiente não foi considerado para as simulações pois a contribuição da transmissão de calor por radiação não foi considerado neste trabalho.

Uma vez que será simulado apenas um dispositivo isolado, a transmissão de calor por radiação pode ser desconsiderada sem perda de precisão no resultado. Acredita-se que caso fossem simulados mais de um dispositivo, a contribuição da radiação para a transmissão de calor passaria a ser relevante.

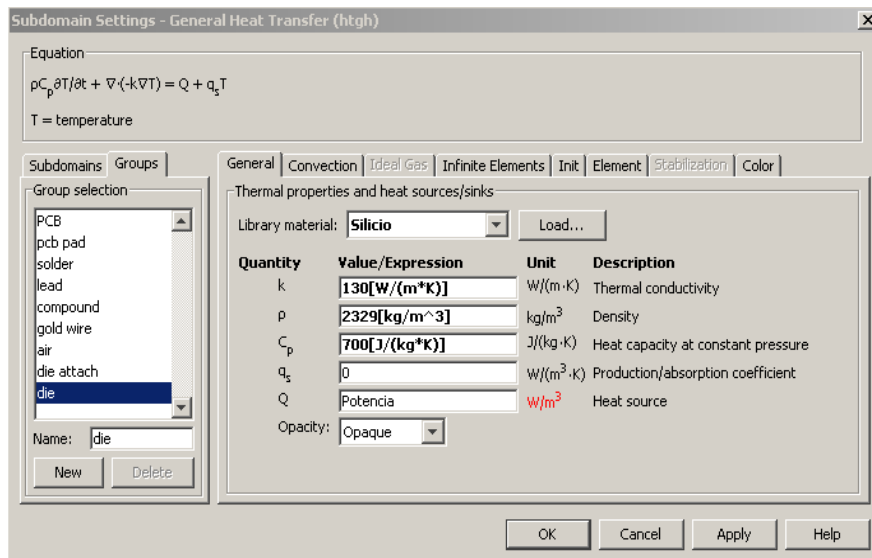


Fig. 3.3: Menu Subdomain Settings, onde é feita a configuração das regiões internas no modelo simulado. Mostrando a configuração realizada para a pastilha de silício.

Nas interfaces dos materiais foram feitas duas considerações:

- Para as interfaces com o ambiente, mostrada na figura 3.4, todo o calor presente na região interna da interface é transmitido para o ambiente através de convecção. Como é mostrado na equação:

$$-n \cdot (-k \nabla T) = q_0 + h(T_{inf} - T), \quad (3.2)$$

sendo q_0 o fluxo de calor interno, h o coeficiente de transmissão de calor por convecção e T_{inf} a temperatura do ambiente. Os valores destes parâmetros são considerados constantes e podem ser vistos na tabela 3.2.

Tab. 3.2: Valores dos parâmetros constantes da equação 3.2. O valor de h foi obtido na referência [10].

Parâmetros	Valor
q_0	0
h	20 W/(m ² K)
T_{inf}	25 °C

- Para as interfaces no interior do modelo, todo o calor presente será transmitido através da

interface, ou seja, entre os materiais. Como é mostrado na equação:

$$-n_u \cdot (-k_u \nabla T_u) - n_d \cdot (-k_d \nabla T_d) = 0. \quad (3.3)$$

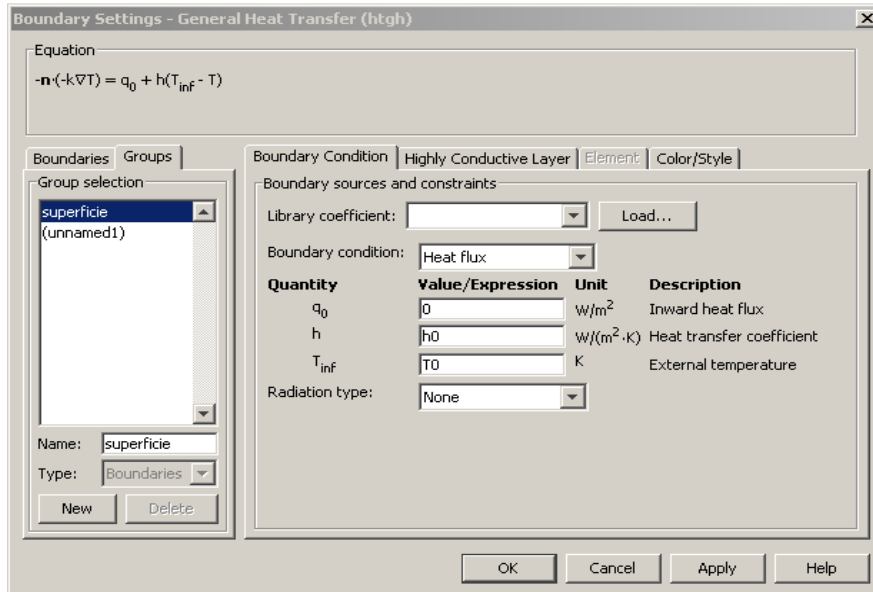


Fig. 3.4: Menu “Boundary Settings”, onde é feita a configuração das interfaces do modelo simulado.

O circuito integrado localizado na pastilha de silício dissipa calor através de efeito Joule, por isso considera-se a pastilha como a fonte de calor no aquecimento do encapsulamento. Uma vez que o intuito do trabalho não é analisar o aquecimento do circuito integrado, mas do encapsulamento com um todo, a pastilha pode ser considerado como uma fonte de calor uniforme. [15]

Os chips utilizados para substituir relés possuem MOSFETs de potência em todas as saídas, que são responsáveis por grande parte da potência total dissipada. Por isso, a potência dissipada pelo MOSFET pode ser considerada como a potência total dissipada pelo circuito integrado na pastilha.

Para obter a potência dissipada durante a operação do MOSFET de potência será utilizada a equação:

$$P_{DISS} = (V_{PWR} - V) \cdot I, \quad (3.4)$$

sendo V_{PWR} o valor da tensão de alimentação, nesta simulação 14,49 Volts, V e I são os valores de

tensão e corrente, mostrados na figura 3.5. A potência obtida é o valor total de potência dissipada. Entretanto, a variável de entrada do modelo deve ser o calor dissipado por unidade de volume. Como a pastilha foi considerado uma fonte de aquecimento uniforme, basta dividir o valor de potência dissipada pelo volume da pastilha de silício e toda a potência dissipada será convertida em calor por efeito Joule, desta maneira é obtido o calor que está sendo dissipado por unidade de volume.[15]

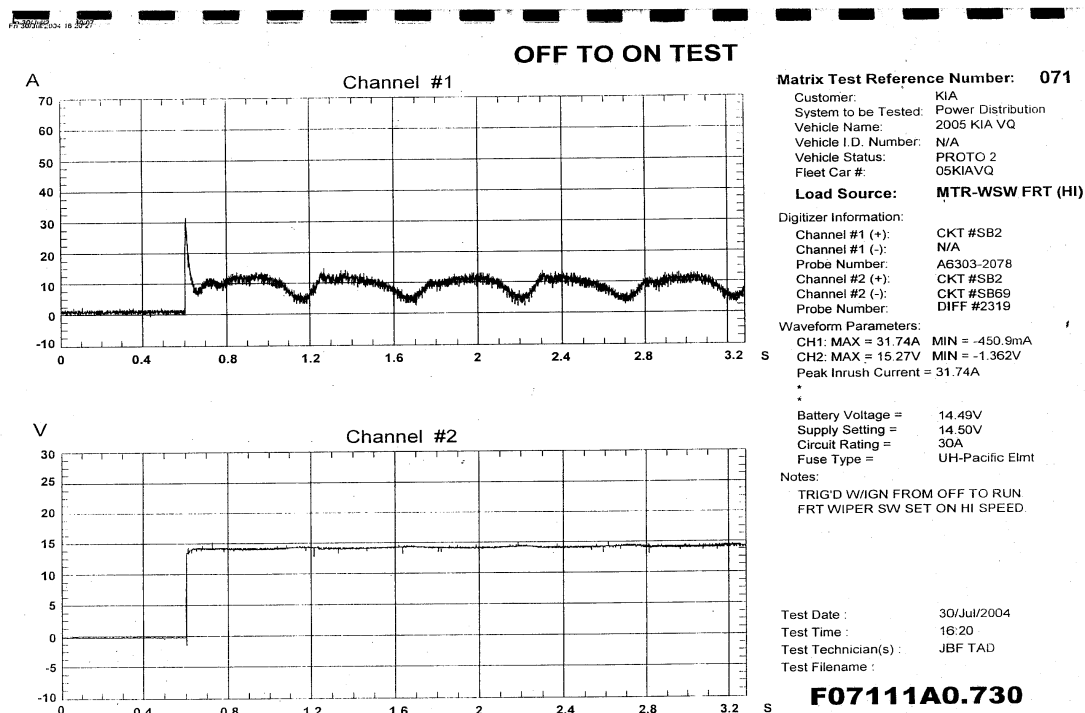


Fig. 3.5: Curvas da variação de tensão e corrente no tempo, referente ao controle de um pequeno motor elétrico de um automóvel KIA.

3.1.2 Construção da malha para os modelos

Na seção 2.3.2 foi explicada a importância da malha e quais cuidados devem ser tomados ao construí-la. A malha deve ser adaptada para descrever bem todas as partes do modelo, através da alteração da quantidade, taxa de crescimento e tamanho de seus elementos, sua taxa de curvatura

e etc. Tanto malhas subestimadas quanto superestimadas terão um impacto negativo na simulação, respectivamente terão resultados imprecisos ou requisição de processamento maior e desnecessária. Neste trabalho, apesar de serem simular modelos bidimensionais, as malhas foram ajustadas para obter-se uma relação ótima entre resultado e requisição de processamento.

A malha é definida a partir do tamanho máximo de seus elementos, o valor padrão do programa é 10% da distância máxima no modelo. A maior distância observada no modelo é de 6,3cm, por isso foi escolhido o tamanho máximo de elemento como sendo 1 cm, aproximadamente 15% da máxima distância. Como já foi falado na seção 2.3.2, os elementos que compõem a malha podem ser triângulos ou quadriláteros. Nesta malha optou-se por uma malha triangular, pois é mais simples de ser implementada. Com essa configuração foi obtida uma malha de 17442 elementos e o tempo de solução foi de 10,015 segundos.

Para aprimorar o resultado, o tamanho máximo do elemento de malha foi reduzido para 1mm, equivalente a aproximadamente 1,5% da distância máxima. Mas a opção por elementos triangulares foi mantida. A malha obtida foi de 17443 elementos e resolvida em 10,671 segundos. Nestas duas malhas iniciais ficou claro que para se descrever um modelo com dimensões muito distintas, é necessário ajustar o tamanho máximo do elemento de malha para cada região do modelo.

O programa Comsol Multiphysics possui uma ferramenta de malhas que permite ajustes individuais nas regiões, interfaces e pontos. Nas regiões pode ser alterado o tamanho máximo, a taxa de crescimento e o formato do elemento de malha. Nas interfaces pode ser alterado o tamanho máximo e a taxa de crescimento do elemento de malha, o fator e o corte da curvatura da malha. Nos pontos pode ser alterado o tamanho máximo e a taxa de crescimento do elemento de malha.

Os ajustes na malha foram iniciados nas regiões de menor dimensão, pois a malha de uma região influencia a malha da região adjacente. Se a malha da região de maior dimensão que possui elementos maiores for criada primeiro, os elementos da região adjacente será maior que o determinado e a região perderá precisão.

As primeiras regiões à terem suas malhas construídas foram: pastilha de silício, fixador da pastilha e fios de ouro. Essas regiões tem em comum a grande diferença entre seu comprimento

e sua largura, por este motivo tamanho máximo do elemento de malha foi definido pelo valor da largura. Para essas regiões o tamanho máximo do elemento foi definido em $10\mu m$, equivalente a 20% da largura do fio de ouro, $50\mu m$.

Em seguida, foram construídas as malhas das regiões: suporte da pastilha, condutor, trilhas, encapsulamento e solda. Esse segundo grupo de regiões possui dimensões maiores que as regiões do grupo anterior, por esse motivo suas malhas podem ter elementos maiores. Para atingir um tamanho máximo de elemento de malha que descrevesse bem as regiões e mantivesse uma boa transmissão com as regiões de menor dimensão foram testados alguns valores e o que apresentou o melhor resultado foi o tamanho máximo de elemento de $100\mu m$.

A última região a ter sua malha construída foi a PCB, seu tamanho máximo de elemento de malha foi definido como $1mm$ e a taxa de crescimento do elemento de malha foi definido com valor de 1,3. Na região abaixo do encapsulamento são necessários elementos pequenos para que a região seja bem descrita, pois haverá um considerável fluxo de calor por essa região. Mas as regiões mais afastadas do encapsulamento quase não tem fluxo de calor, portanto não precisam de uma malha precisa. Por isso, a malha foi construída para que seus elementos aumentem de tamanho a medida que se afastam do centro da PCB.

Na figura 3.6 é mostrada a malha triangular resultante, possuindo 65756 elementos e tempo de resolução de 62,275 segundos.

A eficiência da malha pode ser melhorada através da utilização de elementos quadrilaterais, como explicado na seção 2.3.2. Por isso a geometria dos elementos foi alterada para quadrilateral, mantendo-se as demais condições iguais a malha da figura 3.6. Na figura 3.7 pode-se observar a malha resultante após a forma geométrica dos elementos ter sido alterada, possuindo 33668 elementos e consumindo 70.526 segundos para completar a simulação.

Além de uma menor densidade, observa-se a melhor organização do elementos na malha. Entretanto, a malha perde sua organização e, conseqüentemente, sua precisão nas proximidades de interfaces entre regiões com grande diferença de dimensões. Para melhorar a estrutura da malha foi utilizada a ferramenta “*Mapped Mesh*”. Através desta ferramenta pode ser determinado o número

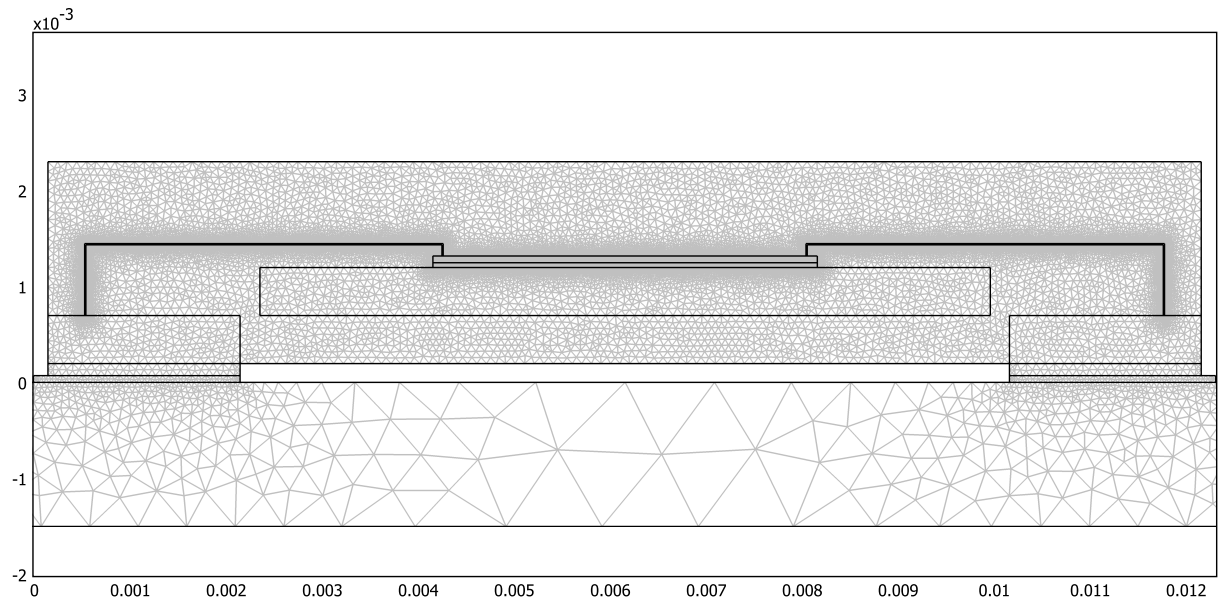


Fig. 3.6: Malha triangular de 65756 elementos, construída com tamanhos máximos de elementos de malha diferentes para cada região.

de pontos em cada borda da região, sendo que os pontos localizados em bordas opostas são ligados entre si por meio de linhas retas.

Em algumas regiões, mesmo utilizando a ferramenta “*Mapped Mesh*” para tornar a malha melhor estruturada, os resultados obtidos são ruins. Nas regiões próximas aos fios de ouro não foi possível obter uma malha bem estruturada, devido a diferença de dimensões muito grande. Para ajustar a malha nessas regiões foi necessário utilizar uma malha mista, composta por elementos triangulares e quadriláteros. Nas regiões dos fios de ouro utilizou-se a malha triangular, mostrada na figura 3.8, e nas demais regiões do modelo utilizou-se a malha quadrilateral, mostrada na figura 3.9.

Na malha da figura 3.9 observa-se que além da estrutura melhor, foi possível aumentar o número de elementos da malha. Esta malha possui 65679 elementos, sendo 11030 triângulos e 54641 quadriláteros, e o tempo consumido para simulação foi de 54.923 segundos. Portanto, aumentou-se a precisão do malha devido ao aumento do número de elementos, mas o sem aumentar a requisição de processamento pois manteve-se o tempo consumido pela simulação.

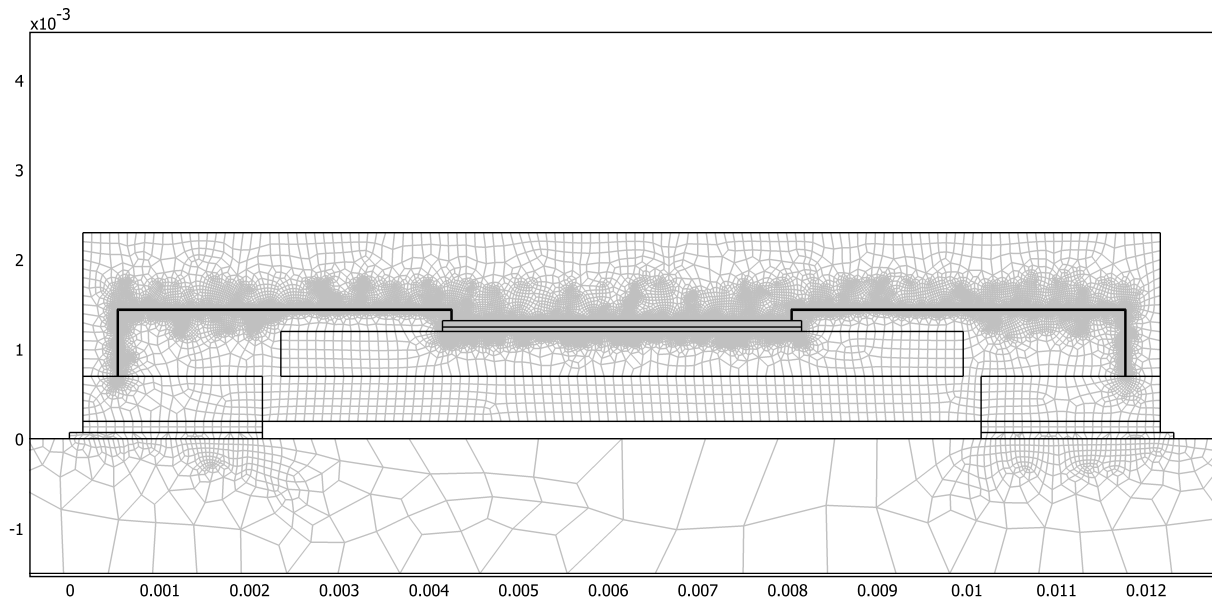


Fig. 3.7: Malha quadrilateral de 33668 elementos.

3.1.3 Definição dos parâmetros e gerenciamento da simulação

Para realizarmos a simulação é necessário definir seus parâmetros. No menu “*Solver Parameters*”, mostrado na figura 3.10, será definido o método de resolução, o algoritmo utilizado para a resolução do sistema linear, o passo da simulação e as tolerância da resolução.

Existem seis métodos de solução possíveis: estacionário, dependente do tempo, autovalores, paramétrica, estacionário segregada, paramétrica segregada e dependente do tempo segregada. Cada método de solução é direcionado para um tipo de simulação. Neste trabalho está sendo avaliado a variação da temperatura do encapsulamento ao longo do tempo, devido a variação da dissipação do calor dissipado pela pastilha de silício. Uma vez que, existe uma variável de entrada e uma de saída, sendo ambas variantes no tempo, foi utilizado o método de resolução dependente do tempo.

Na seção 2.3.3 foi citado que para modelos mais simples é recomendada a utilização de algoritmos diretos para resolver o sistema linear. Sendo os modelos deste trabalho bidimensionais, foi escolhido o algoritmo direto PARDISO para a resolução do sistema linear. A escolha deste algoritmo ocorreu, unicamente, por ser o mais rápido dentre os algoritmos diretos. As tolerâncias serão mantidas com os seus valores padrões de 0,01 para a tolerância relativa e 0,001 para a tolerância

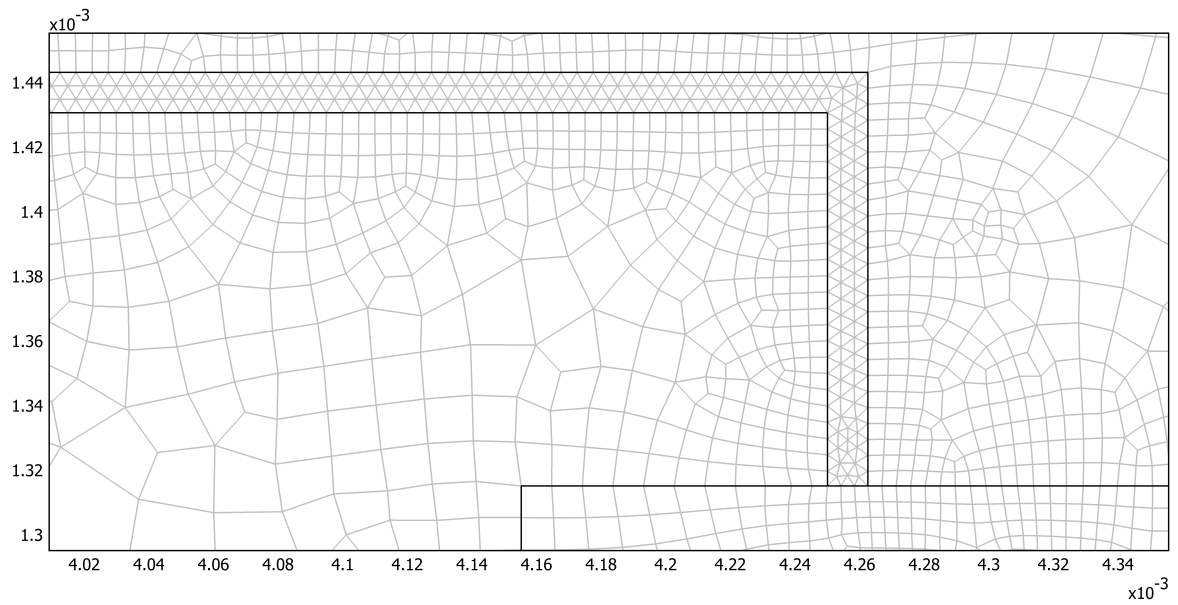


Fig. 3.8: Malha triangular dos fios de ouro.

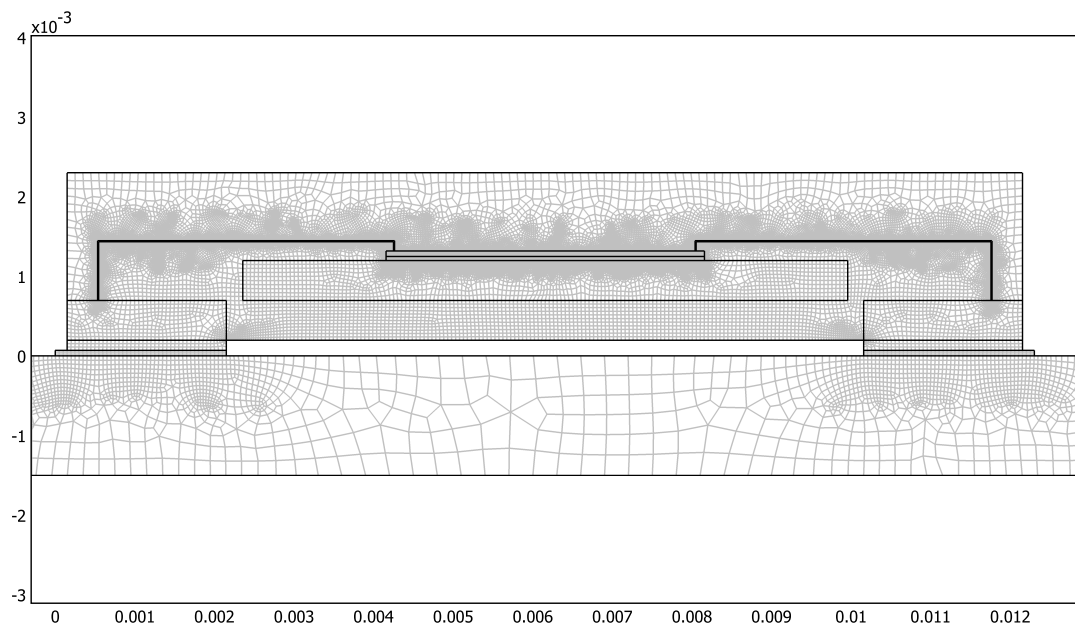


Fig. 3.9: Malha mista utilizada para realizar as simulações dos modelos.

absoluta. O passo da simulação será de 0,1 segundos, sendo o tempo de duração da entrada de 3,2 segundos.

Na figura 3.11 está sendo mostrado o gerenciamento utilizado para a simulação. Neste menu podem ser escolhidos o valor inicial, o valor da variáveis não resolvidas, as entradas e saídas con-

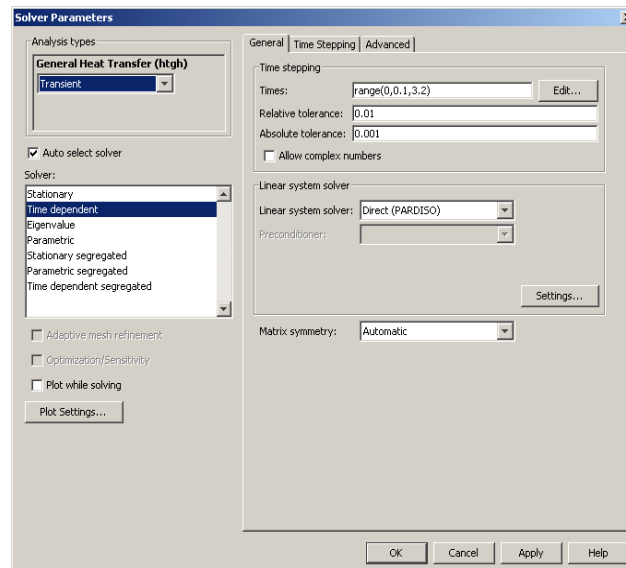


Fig. 3.10: Método de solução e algoritmo de resolução do sistema linear.

sideradas na simulação e a sequência da simulação. Como neste trabalho a única entrada é o calor dissipado pela pastilha e a única saída é temperatura no encapsulamento, o único parâmetro relevante é o valor inicial, escolhido como o valor inicial da expressão. No caso de um número maior de variáveis, seria possível escolher qual variável seria solucionada na simulação.

3.2 Modelagem da simulação térmica de encapsulamento PQFN com montagem *Exposed pad* com *heavy gauges* de alumínio

A simulação apresentada nesta seção utiliza um encapsulamento PQFN com montagem interna *Exposed pad* com *heavy gauges* de alumínio. Esta é a montagem comercialmente utilizada em encapsulamentos PQFN. O objetivo desta simulação é comparar o desempenho desta montagem interna com as montagens apresentadas na seção 3.1 e avaliar a influência da inserção dos *heavy gauges* na temperatura do encapsulamento.

O encapsulamento PQFN é específico para aplicações onde existe uma grande dissipação no chip, como é o caso de aplicações de eletrônica de potência e um dispositivo que utiliza este encapsulamento é o *Extreme switch* [16–18]. A sua configuração interna é *Exposed pad*, como mostrado

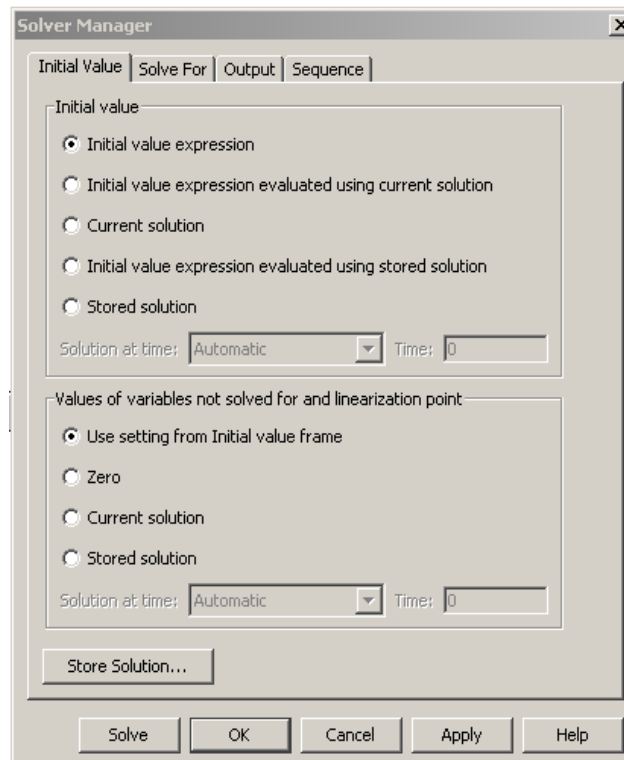


Fig. 3.11: Menu de gerenciamento da simulação.

na seção 3.1, mas substituindo os fios de ouro, de pequeno diâmetro, por *heavy gauges* de alumínio com diâmetro muito maior. Apesar da condutividade térmica do ouro ser 50% maior que a do alumínio, o maior diâmetro do fio de alumínio faz com que o trânsito de calor seja facilitado. Na tabela 3.3 pode ser observado que os materiais utilizados por este modelo são, praticamente os mesmo utilizados na seção 3.1.[27]

Tab. 3.3: Materiais utilizados no modelo de encapsulamento simulado.

Materiais	Condutividade Térmica, $k(W/(m\ K))$	Densidade, $\rho(kg/m^3)$	Capacidade Calorífica, $C_p(J/(kg * K))$
FR4	0,3	1900	1369
Cobre	400	8700	385
Solda, 60Sn-40Pb	50	9000	150
Encapsulante	0,7	1,82	0,8
Alumínio	160	2700	900
Silício	130	2329	700

Assim como na seção 3.1, são utilizados modelos bidimensionais para estas simulações. Uma

vez que a diferença entre este modelo e o apresentado na seção 3.1 é apenas a inserção do *heavy gauges*, foi possível aproveitar quase totalmente o modelo CAD mostrado na figura 3.2c, como mostra a figura 3.12.

As considerações sobre dissipação e transmissão de calor bem com suas equações são consideradas iguais as da seção 3.1. Uma vez que os objetivos desta simulação requerem que uma mesma potência seja dissipada pela pastilha de silício, as curvas de corrente e tensão, mostradas na figura 3.5, serão utilizadas novamente para o cálculo da potência dissipada.

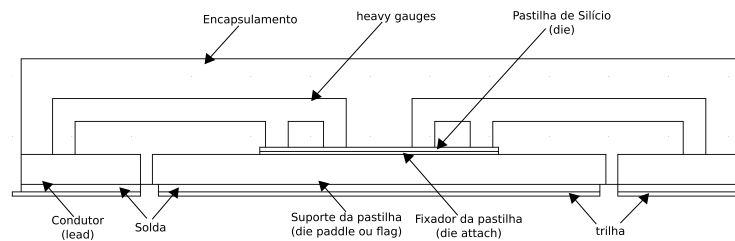


Fig. 3.12: Montagem interna *Exposed pad* com *heavy gauges* de alumínio.

Na construção da malha deste modelo foram aproveitados os valores de tamanho máximo de elemento de malha e a metodologia empregada na seção 3.1.2. A substituição dos fios de ouro pelos *heavy gauges* de alumínio permitiu a criação de uma malha quadrilateral muito regular, mostrada na figura 3.13. Uma vez que a dimensão dos *heavy gauges* é maior, não existe nesta malha uma grande diferença de dimensões entre as regiões, por este motivo foi obtida uma malha mais regular. Consequentemente, foi obtida uma malha com 5385 elementos, número seis vezes menor que o número de elementos da malha mista utilizada na seção 3.1.

Os parâmetros e configurações de gerenciamento utilizados neste modelo são os mesmos apresentados na seção 3.1.3.

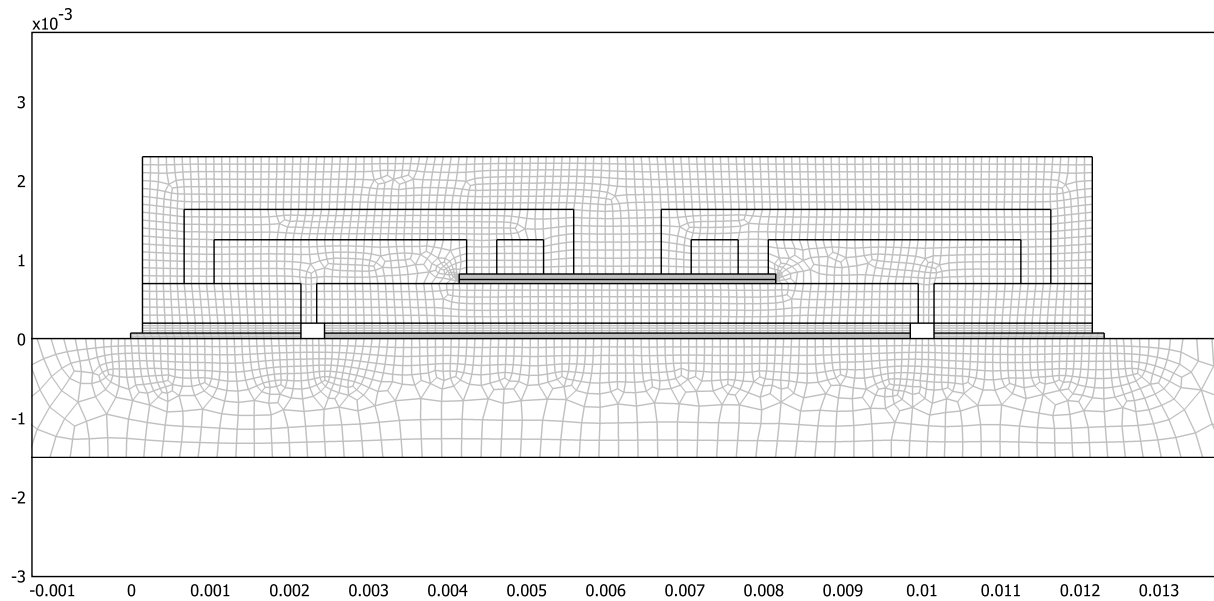


Fig. 3.13: Malha quadrilateral de 5385 elementos, utilizada para descrever o modelo *Exposed pad* com *heavy gauges* de alumínio.

3.3 Modelagem da simulação térmica mostrando a influência do tempo de chaveamento na temperatura do encapsulamento

Na seção 2.1.2 foi mostrado que no MOSFET de potência os picos de dissipação de potência ocorrem durante os chaveamentos. Devido a grande contribuição das perdas de potência durante o chaveamento para o total de perdas no MOSFET de potência e para o aquecimento do encapsulamento, é importante estudar os fatores que irão influenciar tais perdas. Por isso, esta simulação tem como objetivo observar a influência do tempo de chaveamento na potência dissipada pelo MOSFET e, conseqüentemente, sua influência nas temperaturas observadas no interior do encapsulamento.

Nestas simulações foi utilizado o modelo apresentado na seção 3.2, pois é o modelo que mais se aproxima de um dispositivo presente no mercado. As considerações sobre dissipação e transmissão de calor bem com suas equações, são consideradas iguais as da seção 3.2. Como o modelo é o mesmo da seção 3.2, a malha foi mantida igual a da figura 3.13.

As curvas de corrente e tensão, que representam as cargas alimentadas pelo MOSFET, foram alteradas para possibilitar a comparação entre as temperaturas para cada tempo de chaveamento. As novas cargas possuem valores de corrente, tensão e tempo de duração, próximos das curvas utilizadas nas simulações das seções 3.1 e 3.2. Entretanto, as curvas utilizadas nas simulações desta seção, mostradas nas figuras 3.14 e 3.15, possuem características resistivas e não são curvas de cargas reais. Estas curvas foram desenhadas em uma ferramenta CAD de modo que fossem iguais exceto pelo tempo de chaveamento, mostrado na tabela 3.4, pois não foram encontradas curvas de cargas reais que tivessem tais características.

Tab. 3.4: Valores de corrente e tensão carga, tensão de alimentação do MOSFET e tempo de chaveamento para cada uma das curvas simuladas.

	Corrente da carga (A)	Tensão da carga (V)	Tensão de alimentação (V)	Tempo de chaveamento (s)
curva 1	37	11	12	0,52
curva 2	37	11	12	1,10
curva 3	37	11	12	1,67
curva 4	37	11	12	2,25

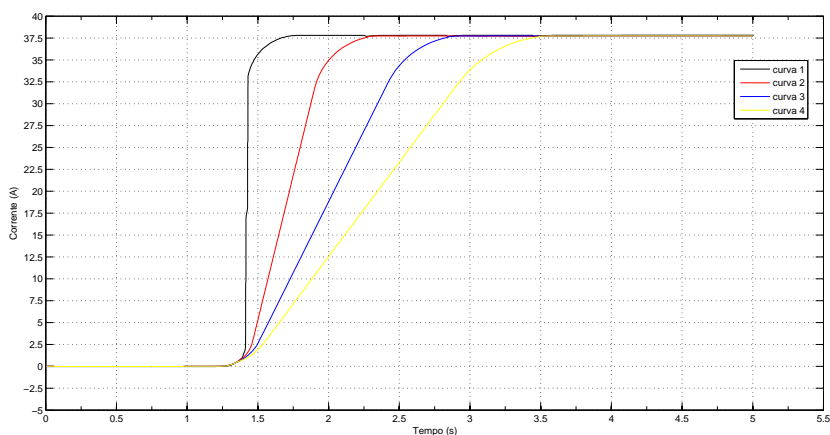


Fig. 3.14: Curva de corrente da carga resistiva.

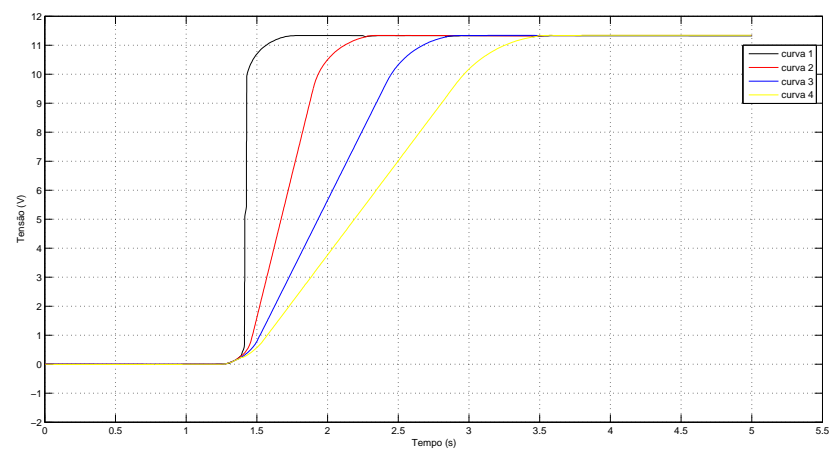


Fig. 3.15: Curva de tensão da carga resistiva.

Capítulo 4

Resultados e Análises

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos nas simulações descritas no capítulo 3. Na primeira seção serão apresentados os resultados obtidos ao simular-se um encapsulamento PQFN com as montagens internas *Standard*, *Standard with Thermally Enhanced Leadframe* e *Exposed Pad*, as observações realizadas serão comparadas com as da referência [9]. Na seção seguinte, será apresentado o resultado da simulação do encapsulamento PQFN com a montagem interna *Exposed Pad* com *heavy gauges*, comparando-se seu desempenho com as montagens apresentadas nas simulações anteriores. Por último, serão apresentados e analisados os resultados das simulações variando-se o tempo de chaveamento.

4.1 Resultados da simulação térmica de encapsulamento PQFN com montagens internas modificadas

A figura 4.1 mostra a variação da temperatura no centro da pastilha da montagem *Standard*. Por este ponto ser o centro da fonte de calor, nele são observadas as maiores temperaturas. Ao comparar as figuras 3.5 e 4.1 pode-se observar os maiores valores de temperatura ocorrendo nas proximidades do chaveamento. O mesmo comportamento é observado nas figuras 4.2 e 4.3, referentes as montagens internas *Standard with Thermally enhanced Leadframe (STEL)* e *Exposed Pad*

(EPad), respectivamente.

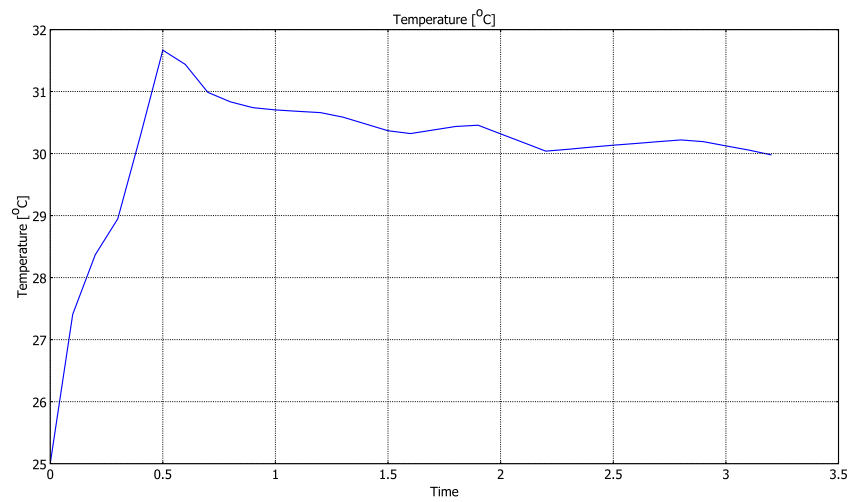


Fig. 4.1: Gráfico temperatura versus tempo, mostrando a variação da temperatura no centro da pastilha para a montagem interna *Standard*.

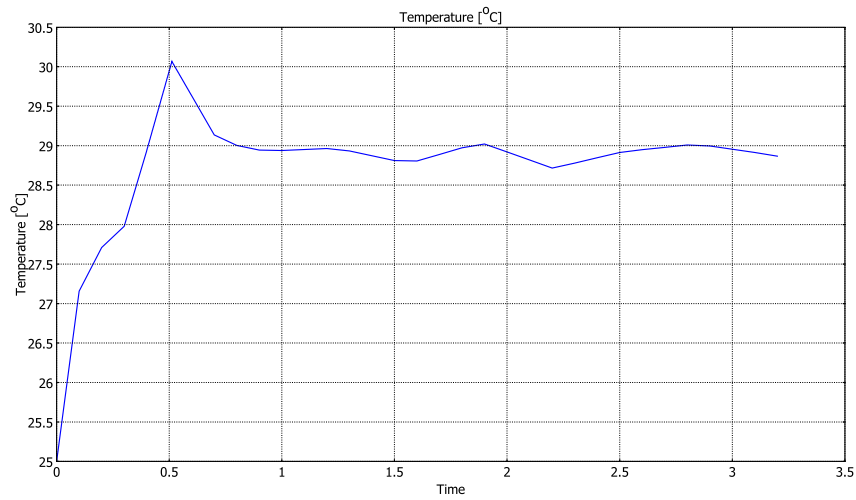


Fig. 4.2: Gráfico temperatura versus tempo, mostrando a variação da temperatura no centro da pastilha para a montagem interna *STEL*.

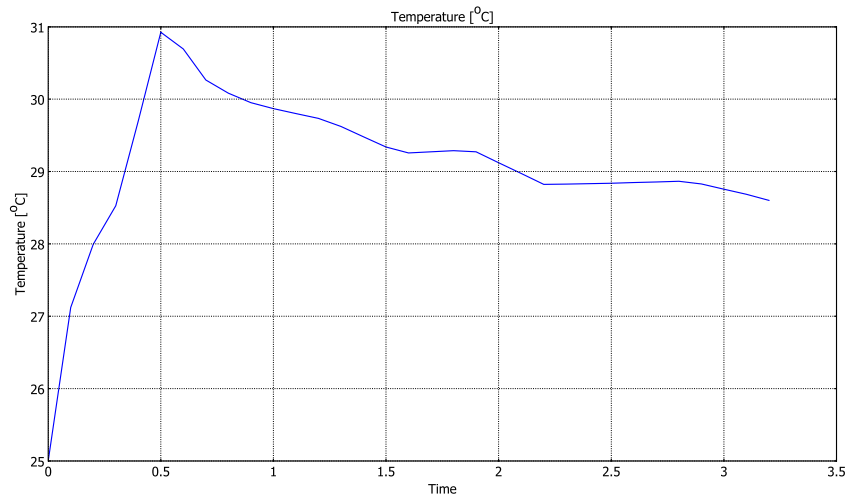


Fig. 4.3: Gráfico temperatura versus tempo, mostrando a variação da temperatura no centro da pastilha para a montagem interna *EPad*.

No gráfico da montagem *Standard*, mostrado na figura 4.1, é possível observar que a máxima temperatura foi de $31,7^{\circ}\text{C}$ e a temperatura após o chaveamento foi de 30°C . Este comportamento ocorre devido a ausência de estrutura de baixa impedância térmica que facilitem a condução do calor dissipado pela pastilha para o ambiente.

A montagem interna *STEL*, como é mostrado na figura 4.2, possui valores de temperatura menores que a montagem *Standard*. Sua máxima temperatura atingida foi de 30°C e sua temperatura após o chaveamento foi de $28,8^{\circ}\text{C}$ esses valores são aproximadamente 5% menores que os observados para a montagem *Standard*. Esta redução na temperatura observada no encapsulamento é devido a inserção de ligações entre os condutores e o suporte da pastilha. Essas ligações criam um caminho de baixa impedância entre a pastilha e o ambiente, fazendo com que uma maior quantidade de calor seja retirada do encapsulamento e, em consequência disso, a temperatura seja menor.

A figura 4.3 mostra a temperatura da montagem *EPad*, sua máxima temperatura atingida foi de $30,8^{\circ}\text{C}$ e sua temperatura após o chaveamento foi de $28,6^{\circ}\text{C}$. Inesperadamente, essa montagem interna teve uma temperatura máxima maior que a montagem *STEL*. Considerando as estrutura das duas montagens era esperado um valor de temperatura menor para a montagem *EPad*, pois a mesma possui o seu suporte da pastilha em contato com a PCB, o que facilita a dissipação do calor

para ambiente. Entretanto, a temperatura final confirmou as expectativas e foi o menor de todas as montagens.

Na tabela 4.1 está a temperatura máxima observada durante a simulação e a temperatura máxima após o chaveamento, ou seja, a temperatura final, para cada uma das montagens internas simuladas.

Tab. 4.1: Temperaturas obtidas ao simular-se a dissipação de calor de um MOSFET de potência com a mesma carga, mas encapsulado com diferentes montagens internas.

Montagem interna	temperatura máxima (°C)	temperatura final (°C)
Standard	31,7	30
STEL	30	28,8
EPad	30,8	28,6

Através das figuras 4.1, 4.2 e 4.3 é possível obter-se a variação da temperatura em um ponto do encapsulamento, mas é uma análise incompleta pois não se sabe o que ocorre no restante do encapsulamento. Por este motivo, deve-se complementar esta análise com gráficos que mostrem a variação da temperatura e como se comporta o fluxo de calor ao longo do encapsulamento e não apenas pontualmente.

Na figura 4.4 é mostrado como o fluxo de calor será distribuído no encapsulamento. Pode-se observar que o fluxo de calor se concentrará nos fios de ouro que ligam a pastilha aos condutores e através do encapsulamento, sendo ambos péssimos condutores de calor. Os fios de ouro tem uma condutividade térmica alta, $317 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, mas um diâmetro muito pequeno e o encapsulamento apesar de ter uma grande área para dissipar o calor, possui uma condutividade térmica baixíssima, $0,7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Portanto, em ambos os casos a resistência térmica será alta e consequentemente será observada uma maior temperatura no interior do encapsulamento.

A figura 4.5 mostra as temperaturas no interior do encapsulamento no mesmo momento em que é observado o pico de temperatura na figura 4.1, ou seja, 0,5 segundos. Nesta figura é possível observar a temperatura máxima do encapsulamento e o aquecimento das regiões adjacentes.

O suporte da pastilha, por ser de cobre, possui temperaturas bem próximas as observadas na pastilha, também é possível observar um princípio de aquecimento nos arredores dos fios de ouro,

por ambos possuírem boa condutividade térmica é observado o aquecimento rápido destas partes. Já o encapsulamento possui condutividade térmica muito baixa, por este motivo suas temperaturas são menores, nas regiões mais afastadas da pastilha sua temperatura ainda é a ambiente. Outra observação a ser feita é a contribuição do suporte da pastilha na dissipação de calor, por ser feito de material com alta condutividade térmica, ele se aquece rapidamente e se torna uma extensão da área de dissipação da pastilha, por este motivo as linhas de temperatura não tem o formato apenas da pastilha, mas do conjunto pastilha e seu suporte. A evolução da temperatura no encapsulamento pode ser melhor observada nas figuras 4.6, onde se tem imagens da temperatura em cada ponto do encapsulamento a cada 0,5 segundo. Nessas figuras é possível observar um maior aquecimento das região acima e abaixo da pastilha e suporte da pastilha, isso ocorre porque o calor dissipado é proporcional a área da superfície de dissipação e as superfícies superior e inferior da pastilha e de seu suporte são muito maiores que as suas superfícies laterais. Na figura 4.6g pode-se perceber que a temperatura do contato entre condutores e PCB é em torno de $27,5^{\circ}\text{C}$, $2,7^{\circ}\text{C}$ abaixo das temperaturas observadas na região central do encapsulamento, essa diferença de temperatura mostra que apenas uma pequena parte do calor está chegando à PCB, justificando as temperaturas mais altas para esta montagem interna.

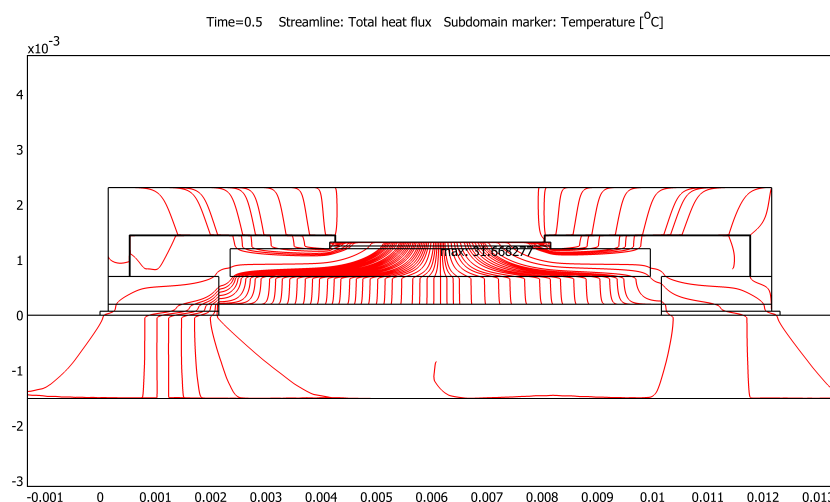


Fig. 4.4: Gráfico das linhas de fluxo de calor para a montagem *Standard* no ponto de máxima temperatura.

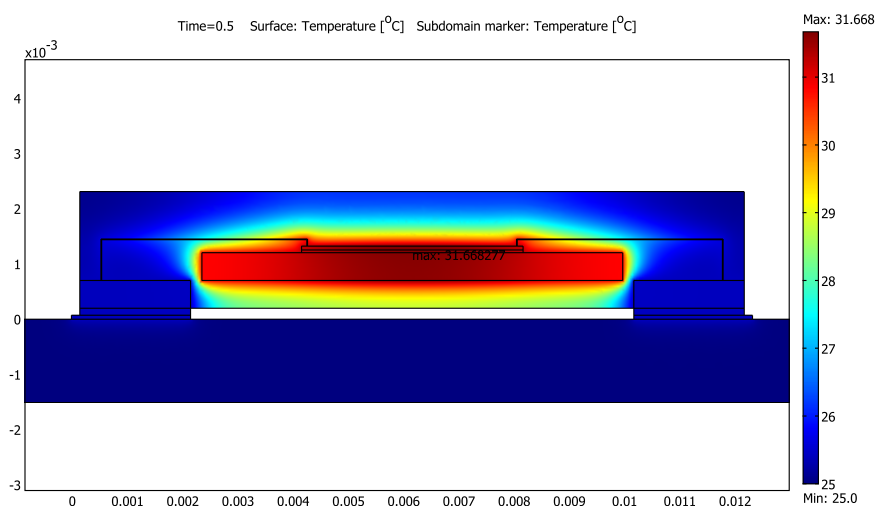


Fig. 4.5: Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna *Standard*, quando tem-se o maior valor de temperatura no encapsulamento.

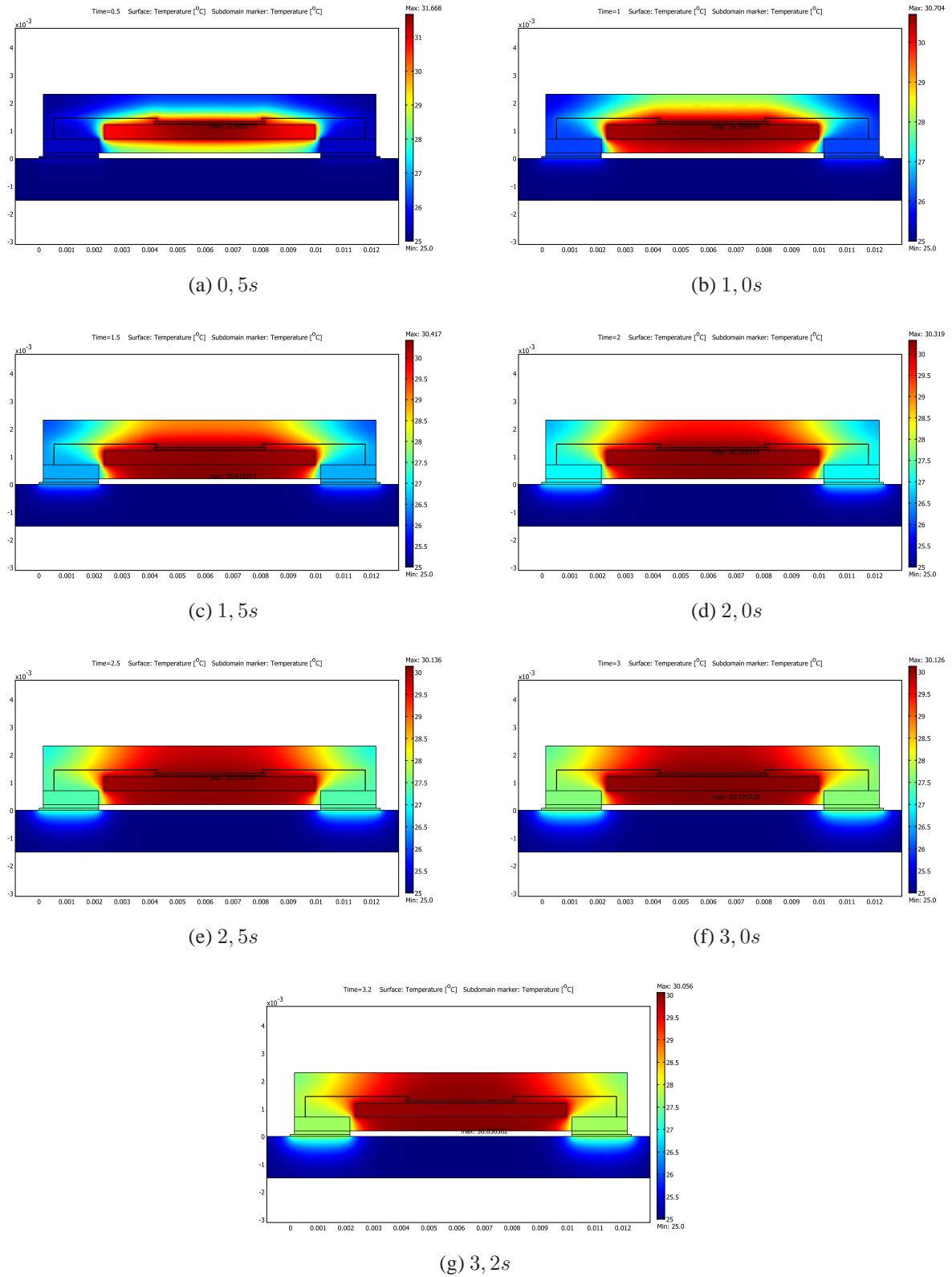


Fig. 4.6: Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna *Standard*.

Ao observar-se as linhas de fluxo de calor na montagem *STEL*, mostrada na figura 4.7, percebe-se que a adição da conexão entre suporte da pastilha e condutores aumenta o fluxo de calor na direção da PCB, auxiliando na redução da temperatura do encapsulamento. Por este motivo temos menores temperaturas nesta montagem interna.

A comparação entre as figuras 4.5 e 4.8 mostra que além de funcionar como caminho de baixa impedância térmica a ligação entre suporte da pastilha e condutores também funciona com dissipador de calor para a pastilha, pois como ambos são feitas de cobre haverá um aquecimento rápido destas partes.

Na sequência de figuras 4.9 é mostrado que o aquecimento do encapsulamento começa a partir das regiões adjacentes aos condutores, suporte da pastilha e pastilha, por este motivos tem-se uma boa distribuição nesta montagem. Como o calor está melhor distribuído não são observadas grandes diferenças de temperatura no encapsulamento, na figura 4.9g observa-se que as temperaturas variam entre 28°C e $28,9^{\circ}\text{C}$. Além disso, observa-se na mesma figura 4.9g que a temperatura na proximidades da interface entre condutores e PCB é de 28°C , esses maiores valores de temperatura na PCB mostram que mais calor está sendo transferindo para fora do encapsulamento.

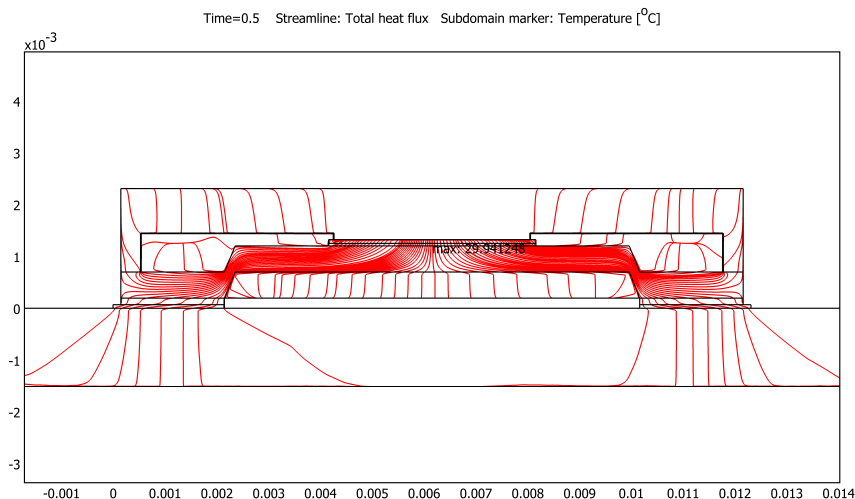


Fig. 4.7: Gráfico das linhas de fluxo de calor para a montagem *STEL* no ponto de máxima temperatura.

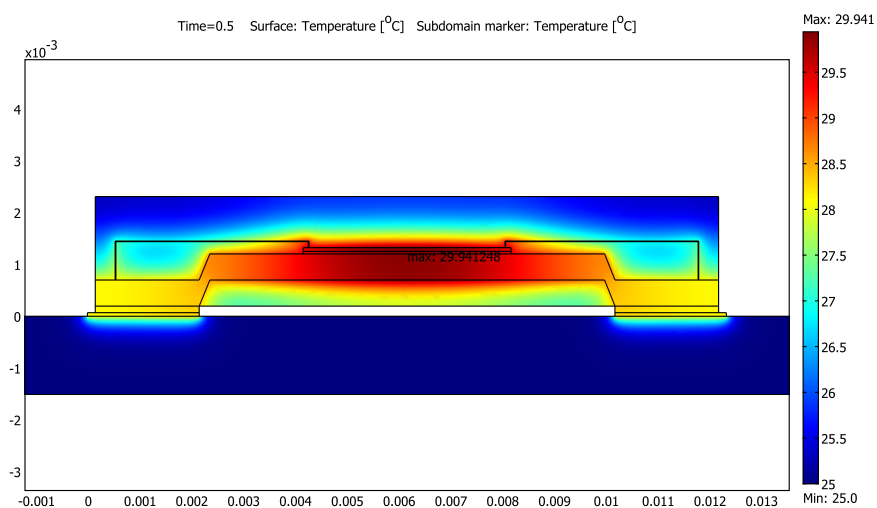


Fig. 4.8: Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna *STEL*, quando tem-se o maior valor de temperatura no encapsulamento.

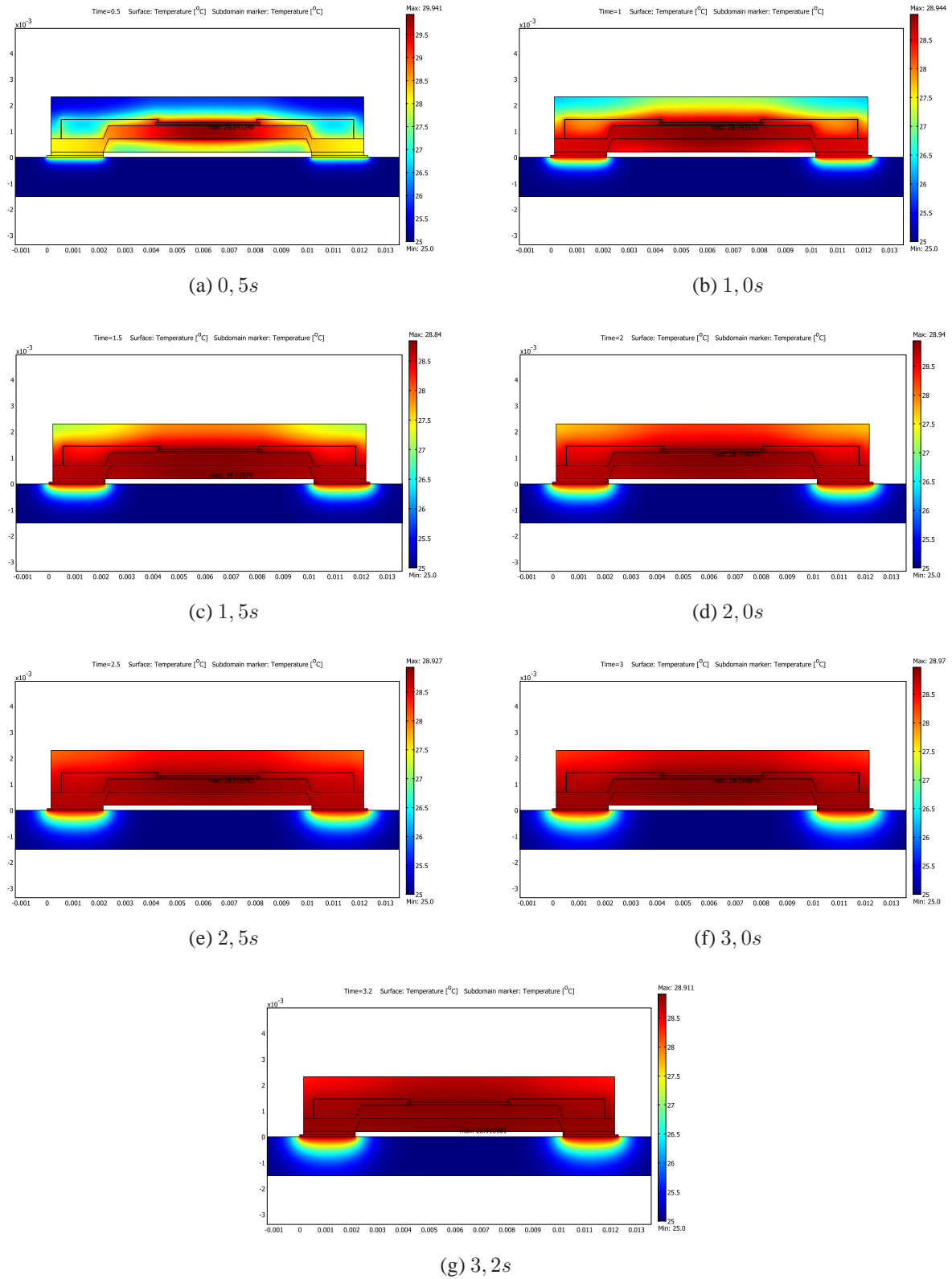


Fig. 4.9: Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna *STEL*.

Na figura 4.10 observa-se porque a montagem *EPad* possui a menor temperatura ao final da simulação e a maior queda de temperatura das três montagens internas. O seu suporte da pastilha em contato direto com a PCB proporciona um bom caminho de baixa impedância térmica, permitindo que o calor seja transferido eficientemente para fora do encapsulamento.

Ao contrário da montagem *STEL*, a montagem *EPad* não possui uma estrutura que distribui o calor ao longo de todo o encapsulamento, portanto são encontrados valores de temperatura com maior variação nesta montagem. Os valores de temperatura observados na figura 4.12g variam de 26,5°C até 28,6°C.

Por ter as suas estruturas dissipadoras de calor concentradas na região central do encapsulamento, também é observado um maior aquecimento nesta região. Na figura 4.11, onde é mostrado o maior valor de temperatura, pode-se observar que no começo do aquecimento já começa a ocorrer transferência de calor para a PCB. Se forem observadas as figuras 4.12 se percebe que o aquecimento da PCB é muito maior para esta montagem interna, a temperatura observada na região de com a PCB é de 28°C, além disso uma região maior da PCB atinge temperaturas iguais as do interior do encapsulamento.

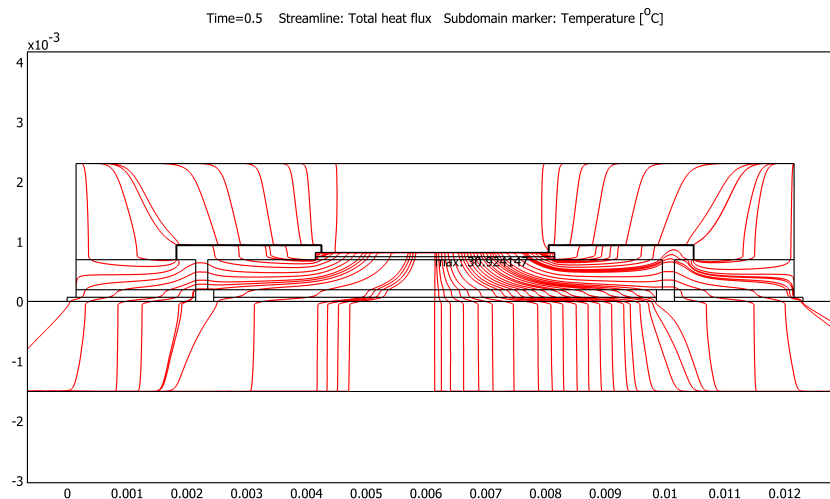


Fig. 4.10: Gráfico das linhas de fluxo de calor para a montagem *EPad* no ponto de máxima temperatura.

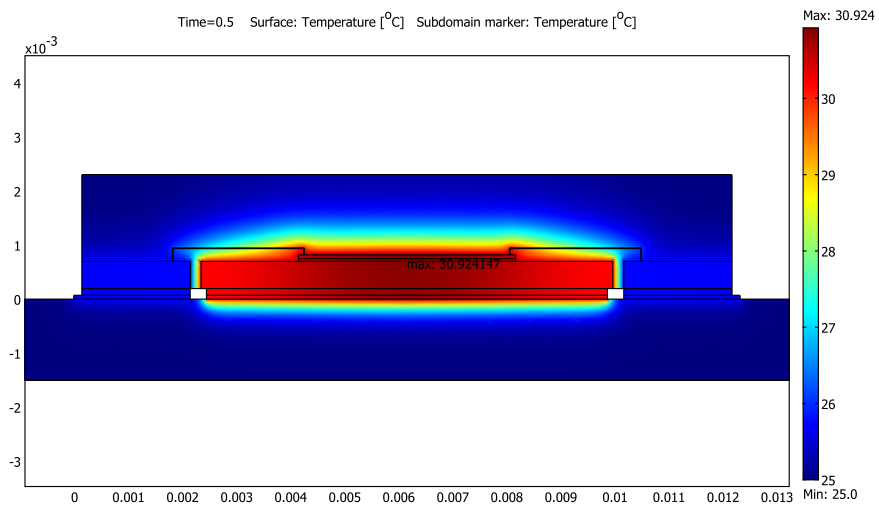
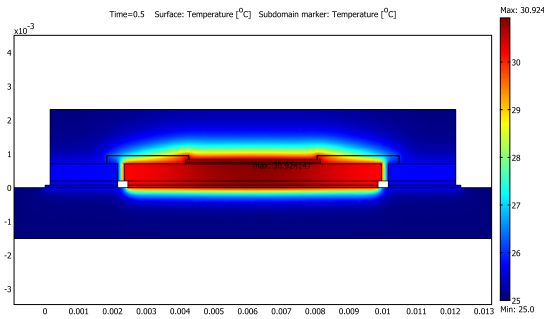
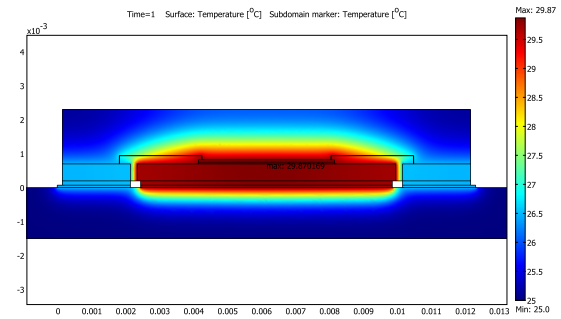


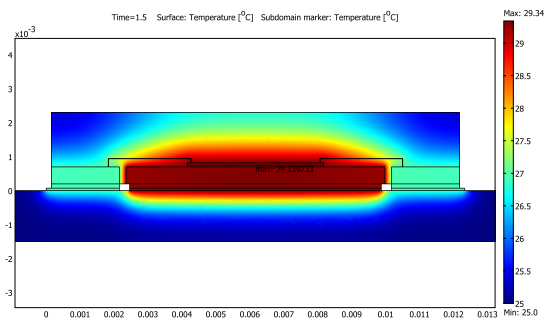
Fig. 4.11: Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna *EPad*, quando tem-se o maior valor de temperatura no encapsulamento.



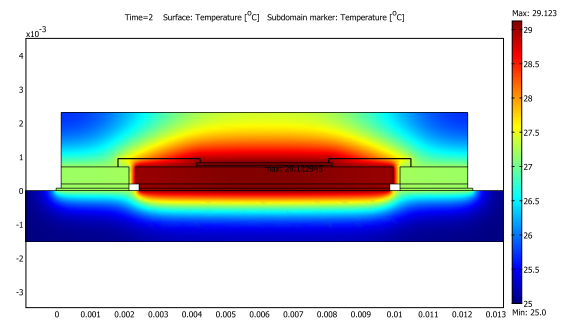
(a) 0,5s



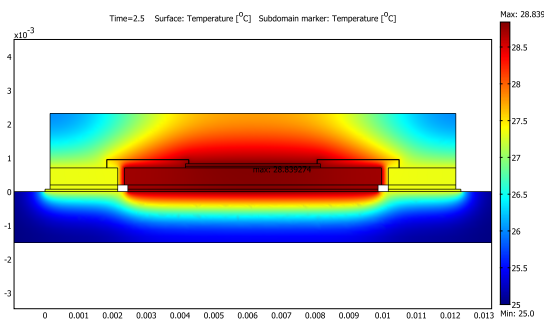
(b) 1,0s



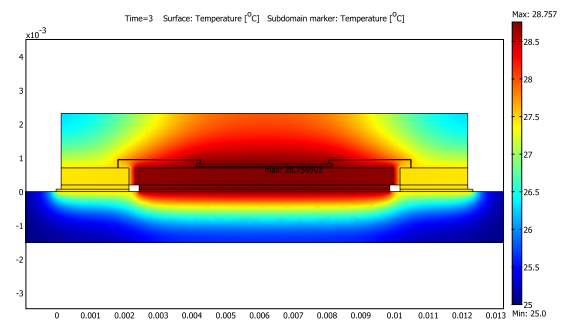
(c) 1,5s



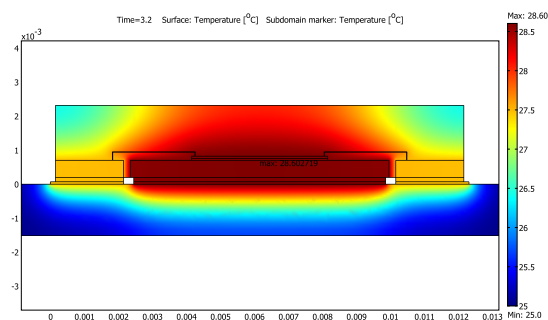
(d) 2,0s



(e) 2,5s



(f) 3,0s



(g) 3,2s

Fig. 4.12: Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna *EPad*.

4.2 Resultado da simulação térmica de encapsulamento PQFN com montagem *Exposed pad* com *heavy gauges* de alumínio

Ao comparar as temperaturas observadas para as montagens *Standard*, *STEL* e *EPad*, na seção 4.1, com as observadas na montagem interna *EPad* com *heavy gauges* de alumínio, foram observadas reduções na temperatura de até 10%. Essa melhora é explicada pela substituição dos fios de ouro por *heavy gauges* de alumínio, como foi falado na seção 3.2, os *heavy gauges* possuem um diâmetro maior que o dos fios de ouro permitindo que uma maior quantidade de calor seja transmitida.

Na tabela 4.2 pode-se observar que tanto a temperatura máxima quanto a temperatura final (pós chaveamento) tem valores consideravelmente menores na montagem *EPad* com *heavy gauges*. Os valores apresentados na tabela 4.2 foram obtidos na figura 4.13, onde também é observado, assim como na seção 4.1, que o pico de temperatura é próximo ao chaveamento. O pico de temperatura perto do chaveamento é justificado pelo pico de potência dissipada que ocorre durante este momento, ocasionando maior dissipação de calor e maior aquecimento do sistema.

Tab. 4.2: Temperaturas obtidas ao simular-se a dissipação de calor de um MOSFET de potência com carga resistiva, utilizando as montagens internas *Standard*, *STEL*, *EPad* e *EPad* com *heavy gauges* de alumínio.

Modelo	Temperatura máxima (°C)	Temperatura final (°C)
<i>Standard</i>	31,7	30
<i>STEL</i>	30	28,8
<i>EPad</i>	30,8	28,6
<i>EPad</i> com <i>heavy gauges</i> de alumínio	27,7	26,9

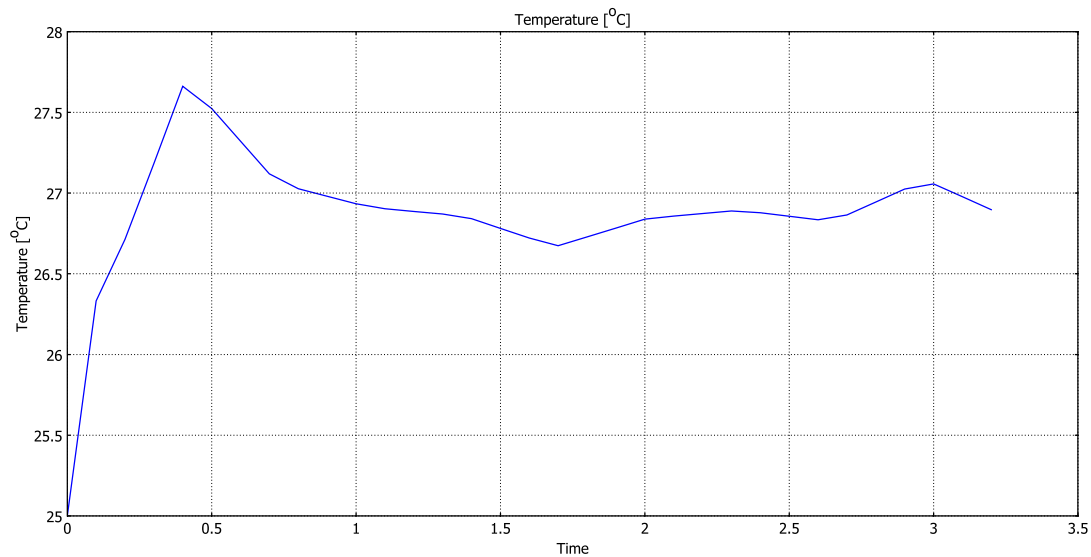


Fig. 4.13: Gráfico temperatura versus tempo, mostrando a variação da temperatura no centro da pastilha para a montagem interna *EPad* com *heavy gauges* de alumínio.

Ao comparar as figuras 4.10 e 4.14 observar-se que os *heavy gauges* aumentam o fluxo de calor entre a pastilha e o exterior do encapsulamento. As linhas de fluxo de calor ficam divididas entre o *heavy gauges* e o condutor exposto, mas ambos os caminhos possuem uma impedância térmica baixa pois são feitos de materiais metálicos, por este motivo são observadas temperaturas menores para esta montagem interna. Comparando a figura 4.16g com as apresentadas na seção 4.1 é observado que, na primeira, o aquecimento da PCB não ocorre apenas pelos condutores laterais ou pelo condutor exposto, mas por ambos. Ou seja, uma quantidade maior de calor está chegando à PCB e com isso a temperatura do encapsulamento fica menor.

A figura 4.15 mostra o aquecimento do encapsulamento durante o pico de temperatura, observa-se nesta figura que o aquecimento do alumínio, que compõe os *heavy gauges*, é mais lento que o do cobre, que compõe o suporte da pastilha, isso ocorre devido a diferença de condutividade térmica entre os dois materiais. Esta diferença de temperatura diminui com o passar do tempo, como mostra a figura 4.16, em 3,2 segundos essa diferença é menor que 0,5 °C. Essa melhor distribuição do calor dissipado pela pastilha faz que o calor seja conduzido mais eficientemente para o exterior do encapsulamento. Além disso, distribuir melhor o calor dissipado evita o surgimento de pontos

superaquecidos ou de regiões com grande diferença de temperatura, que devido aos diferentes coeficientes de dilatação térmica poderia provocar uma falha ou quebra no encapsulamento.

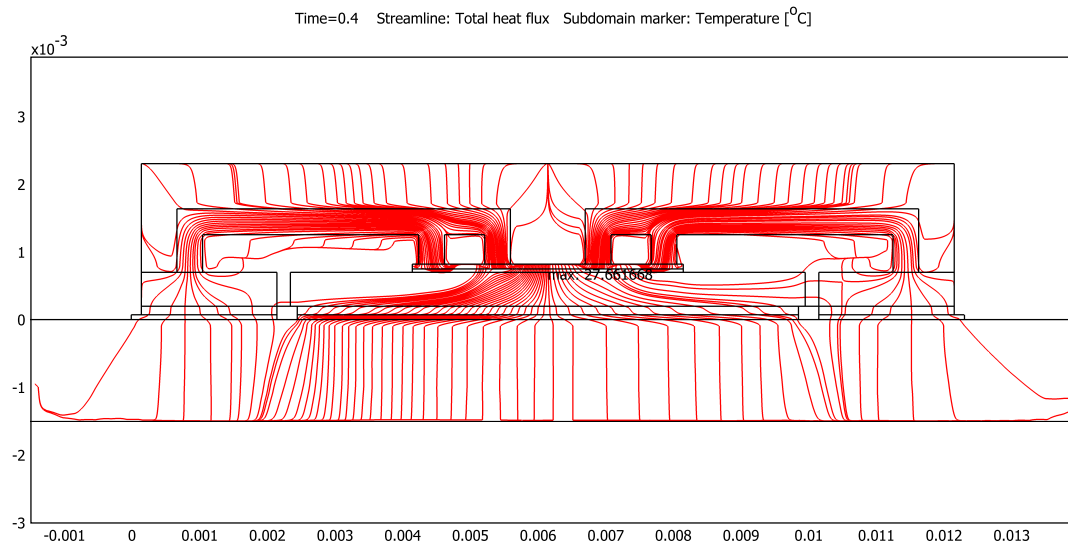


Fig. 4.14: Gráfico das linhas de fluxo de calor para a montagem *EPad* com *heavy gauges* de alumínio no ponto de máxima temperatura.

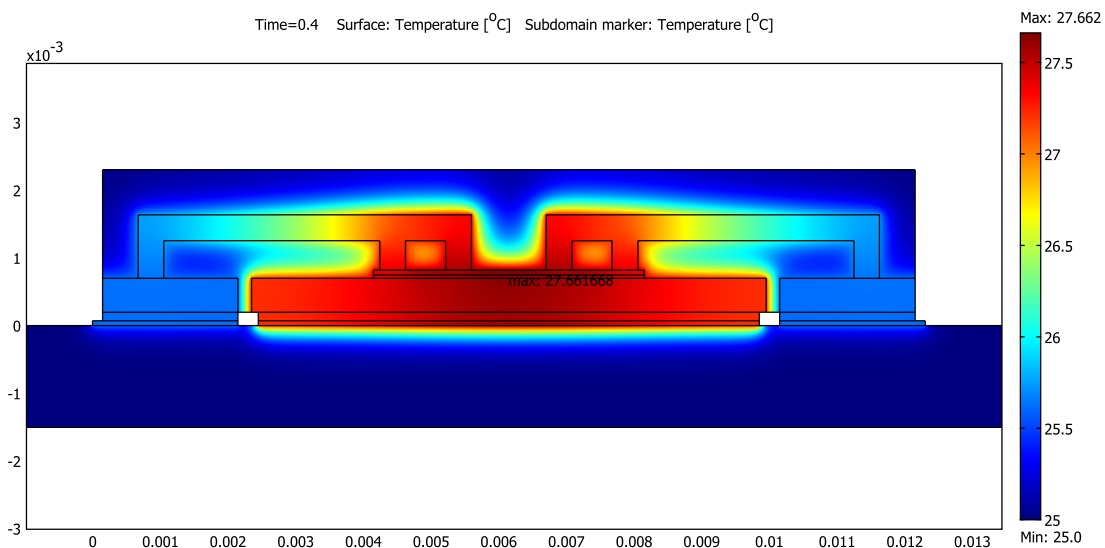


Fig. 4.15: Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna *EPad* com *heavy gauges* de alumínio, quando tem-se o maior valor de temperatura no encapsulamento.

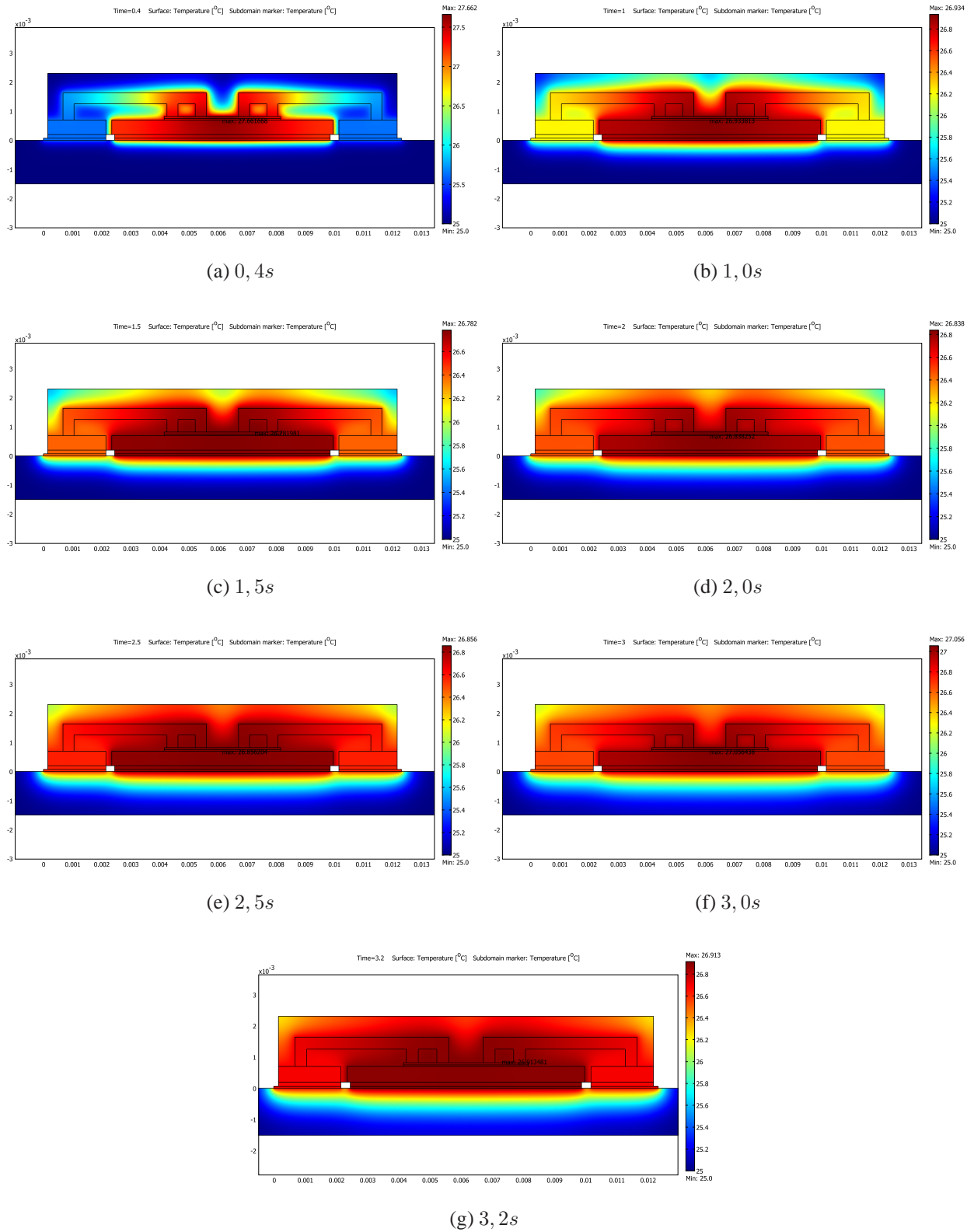


Fig. 4.16: Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna *EPad* com *heavy gauges* de alumínio.

4.3 Resultado da simulação térmica mostrando a influência do tempo de chaveamento na temperatura do encapsulamento

Na figura 4.17 observar-se como a alteração do tempo de chaveamento afeta a potência dissipada pelo MOSFET de potência. Os valores instantâneos da potência dissipada sofrem pouca alteração com o aumento do tempo de chaveamento, mas potência total dissipada irá aumentar para tempos de chaveamento maiores. Como já mostrado na seção 2.1.2, o pico de potência dissipada durante o chaveamento é decorrente do cruzamento das curvas de corrente e tensão, pois ambas terão valores diferentes de zero durante o chaveamento e seu produto será maior. Por esse motivo, aumentar o tempo de chaveamento aumentará o tempo em que o produto destas curvas terá valores maiores.

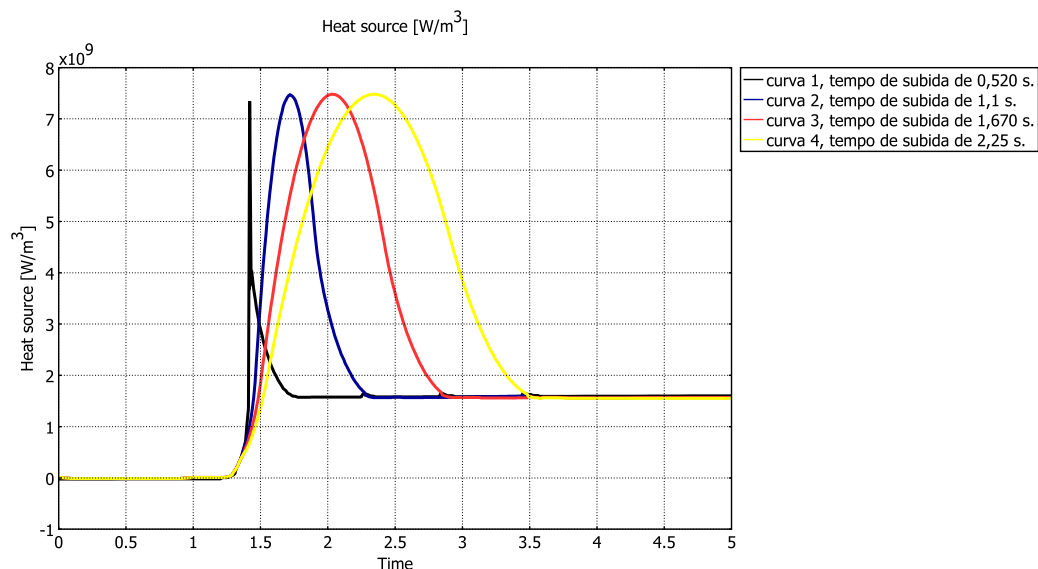


Fig. 4.17: Potência dissipada por MOSFET de potência durante chaveamento, para tempos de chaveamento diferentes.

O resultado do aumento da potência dissipada total é o aumento do calor gerado na pastilha, provocando um aumento das temperaturas observadas no encapsulamento. Na tabela 4.3 estão os valores máximos de temperatura obtidos para cada um dos tempos de chaveamento, retirados das

figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21.

Tab. 4.3: Temperatura máxima obtida para cada tempo de chaveamento.

	Tempo de chaveamento (s)	Temperatura máxima (°C)
Curva 1	0,52	43,211
Curva 2	1,10	47,769
Curva 3	1,67	52,846
Curva 4	2,25	58,192

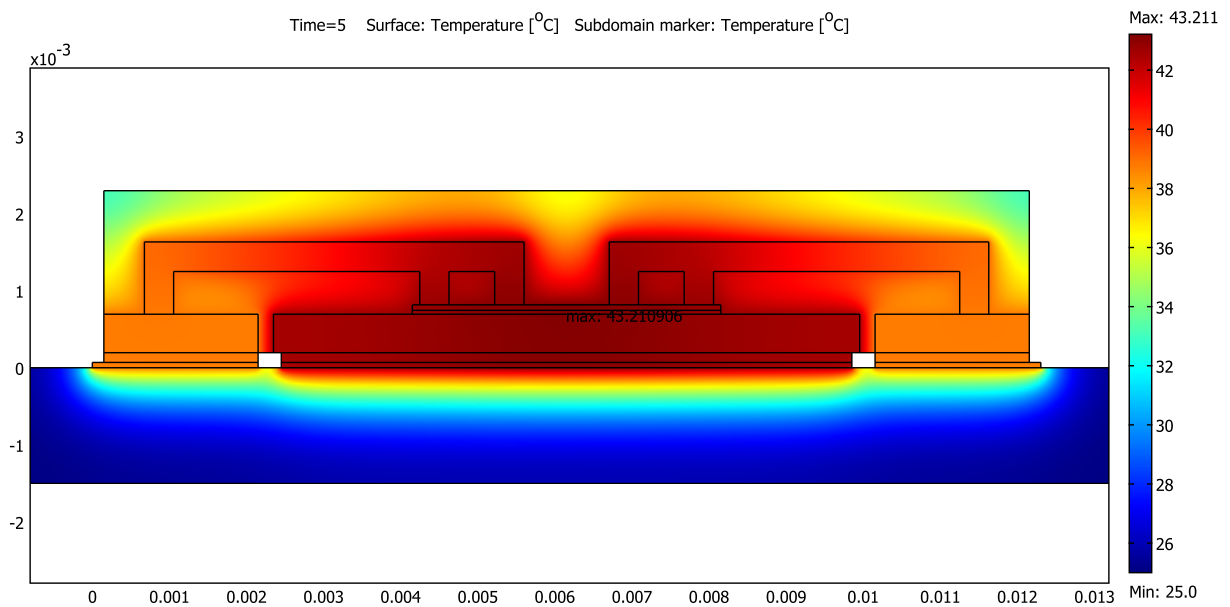


Fig. 4.18: Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna *EPad* com *heavy gauges* de alumínio, para tempo de chaveamento de 0,52 segundos.

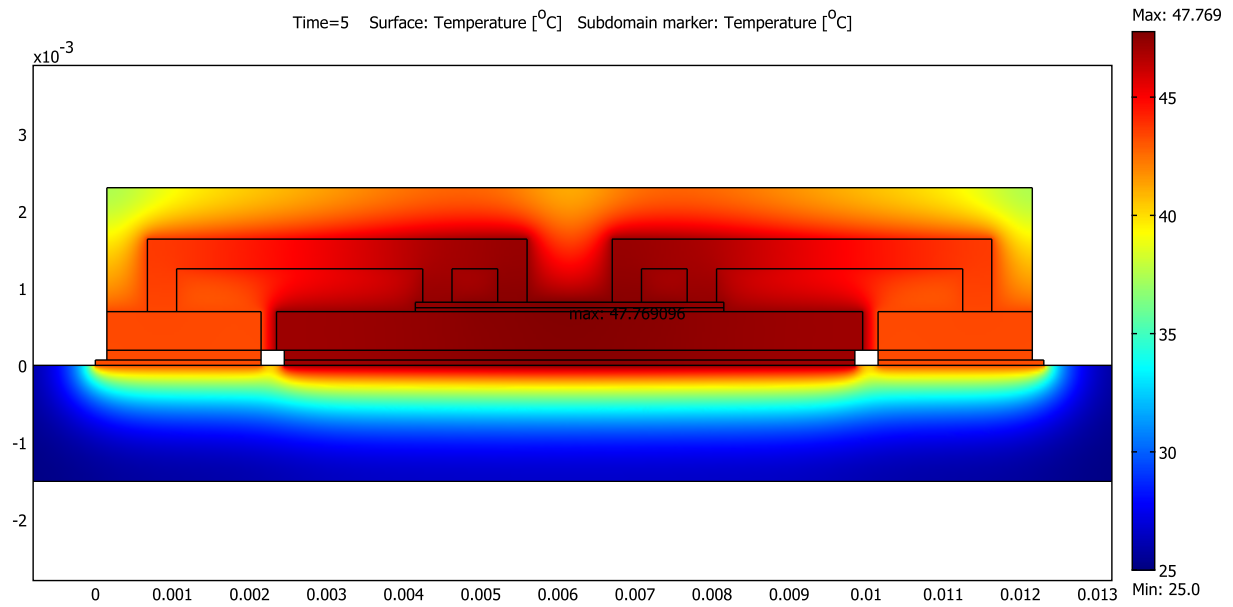


Fig. 4.19: Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna *EPad* com *heavy gauges* de alumínio, para tempo de chaveamento de 1,10 segundos.

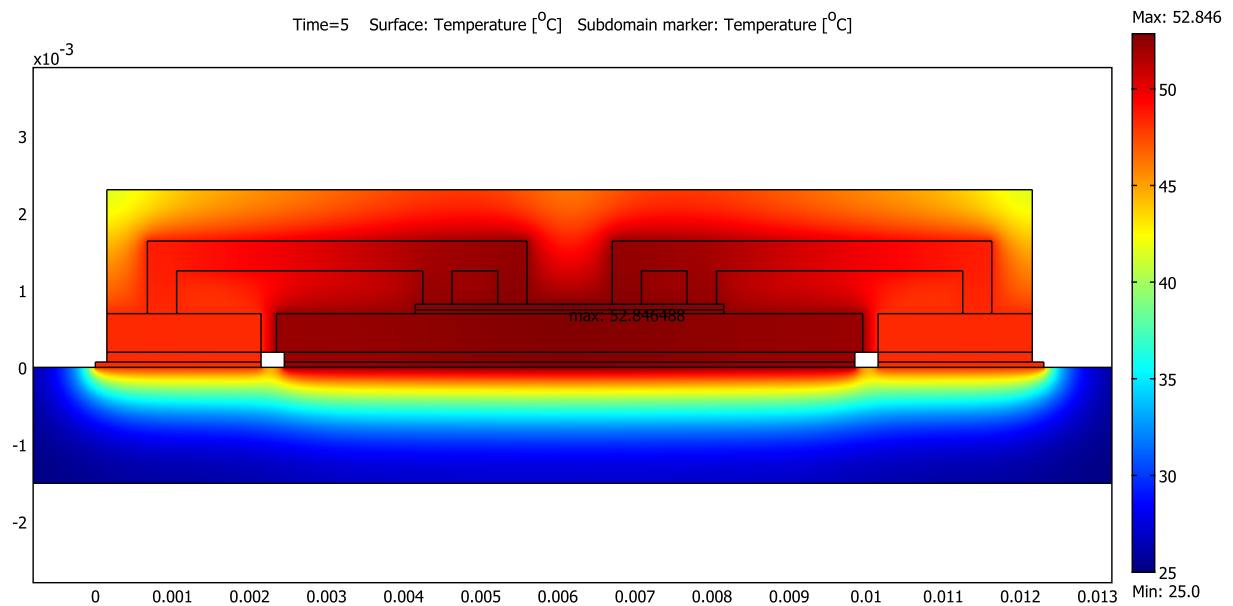


Fig. 4.20: Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna *EPad* com *heavy gauges* de alumínio, para tempo de chaveamento de 1,67 segundos.

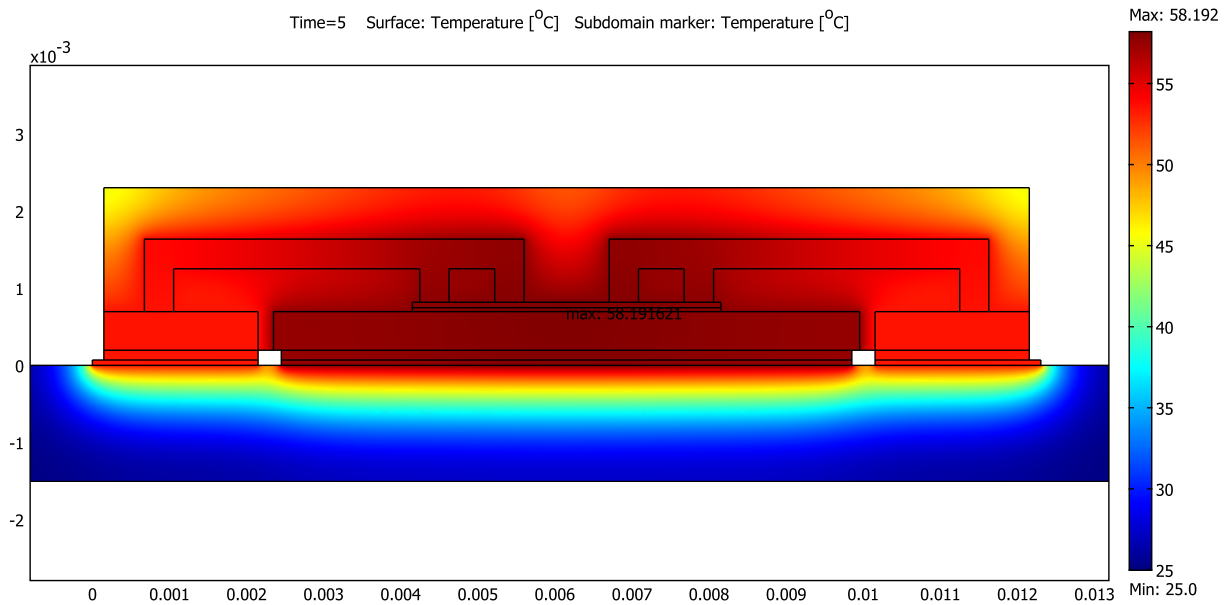


Fig. 4.21: Variação das temperaturas no interior do encapsulamento com montagem interna *EPad* com *heavy gauges* de alumínio, para tempo de chaveamento de 2,25 segundos.

4.4 Comentários finais

Na seção 4.1 foram apresentados os resultados obtidos ao se simular as montagens internas *Standard*, *STEL* e *EPad*. Os objetivos destas simulações eram observar a influência da montagem interna no aquecimento do encapsulamento, utilizando simulação FEM e comparar as conclusões obtidas por meio de simulação FEM com as observadas na referência [9].

Segundo a referência [9], as temperaturas internas do encapsulamento devem ser maiores na montagem interna *Standard* e menores na *EPad*, já a montagem *STEL* possui comportamento intermediário. Nas simulações observou as maiores temperaturas na montagem interna *Standard*, pois a mesma não possui bom caminhos para se conduzir o calor para fora do encapsulamento. A montagem *EPad* teve a menor temperatura final, mas sua temperatura máxima foi maior que a observada na montagem *STEL*. Acredita-se que esta discrepância deve-se ao fato das simulações estarem sendo feitas por um modelo bidimensional sendo o dispositivo real tridimensional e assi-

métrico, não representando totalmente a diferença entre as áreas de dissipação de calor para cada montagem interna. Foi possível observar quais os melhores e piores caminhos para se conduzir calor para o exterior do encapsulamento e como a temperatura irá alterar-se no encapsulamento.

Na seção 4.2 foi simulada a montagem interna *EPad* com *heavy gauges* de alumínio, muito utilizada nos encapsulamentos PQFN. Os objetivos desta simulação eram comparar a montagem *EPad* com *heavy gauges* com as montagens apresentadas na seção 4.1 e observar a influência do *EPad* com *heavy gauges* na temperatura do encapsulamento.

A montagem interna *EPad* com *heavy gauges* de alumínio se mostrou melhor que as montagens da seção 4.1, apresentando temperaturas até 10% menores. Os *heavy gauges* aumentaram o calor dissipado pelo encapsulamento pois criaram mais um caminho de baixa impedância térmica para dissipar o calor. Além disso distribuíram melhor o calor no encapsulamento, evitando o surgimento de pontos superaquecidos e grandes diferenças de temperaturas que poderiam ocasionar falhas e quebras no encapsulamento.

Na seção 4.3 foi simulada a montagem interna *EPad* com *heavy gauges* de alumínio, variando-se o tempo de chaveamento das curvas de corrente e tensão da carga. Nestas simulações foi observado que curvas com tempo de chaveamento mais lento fazem com que mais calor seja dissipado pelo chip, causando o aumento das temperaturas observadas no interior do encapsulamento. Portanto, reduzir o tempo de chaveamento contribuirá com a redução das temperaturas observadas em um encapsulamento.

Ao comparar em porcentagem os valores de tempo de chaveamento e temperatura máxima das curvas 1 e 4, observa-se que para se obter um aumento de temperatura de 35% o aumento do tempo de chaveamento é de 332%. Portanto, para um único chaveamento o aumento de temperatura provocado pelo aumento de tempo de chaveamento é pouco relevante. Entretanto, em aplicações onde o transistor é utilizado como chave, ele é chaveado com uma frequência muito elevada, esse grande número de chaveamento ocorrendo por segundo faz com que a influência do tempo de chaveamento sobre a temperatura seja considerável. Por este motivo o aumento da frequência de operação provoca o aumento da temperatura do encapsulamento.

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho foram investigados dois aspectos que afetam no aquecimento de um encapsulamento: a montagem interna utilizada e a variação do tempo de chaveamento.

A relevância destes tópicos cresceu com o desenvolvimento da tecnologia de circuitos integrados, hoje os chips possuem bilhões de transistores, as frequências de operação podem atingir Giga-hertz e a aplicação de circuitos integrados varia de baixíssima até altas potências. Pois juntamente com a evolução do circuitos veio o aumento do aquecimento. Centenas de milhões de transistores em um chip dissipam muito calor em uma pequena área, altas frequências de operação significam muitos chaveamentos por segundo e operar com cargas de alta potência significa uma alta potência dissipada. Por esse motivos estudar o aquecimento de um chip e seu encapsulamento, buscando soluções para reduzir seu aquecimento tornou-se importante.

Para investigar a influência da montagem interna nas temperaturas observadas no encapsulamento, bem como as soluções empregadas para reduzi-las, foram feitas simulações de um encapsulamento *Power Quad Flat No-Lead* (PQFN) variando-se sua montagem interna. A referência [9] comparou três montagens internas: *Standard*, *Standard with Thermally Enhanced Leadframe* e *Exposed Pad*, fazendo observações sobre elas. De modo a poder comparar as observações feitas nesta referência com os resultados obtidos através de simulações, nas primeiras simulações foram utilizadas as montagens internas *Standard*, *Standard with Thermally Enhanced Leadframe* e

Exposed Pad. Na sequência simulou-se a montagem interna *Exposed Pad* com *heavy gauges* de alumínio, esta montagem interna é empregada para aplicações onde há grande dissipação de calor, como eletrônica de potência.

Nos resultados obtidos através destas simulações comparou-se o aquecimento em cada uma das montagens internas, observando suas causas e consequências. Comparando as quatro montagens observou-se um melhor desempenho da *Exposed Pad* com *heavy gauges*, para esta montagem foram obtidos os menores valores de temperatura. O motivo deste melhor desempenho é a existência de dois caminhos de baixa impedância térmica para conduzir o calor dissipado na pastilha de silício para a PCB ou o ambiente.

Além disso, observou-se uma menor variação de temperatura no encapsulamento para os modelos *Standard with Thermally Enhanced Leadframe* e *Exposed Pad* com *heavy gauges*. Acredita-se que encapsulamentos com menor variação da temperatura interna são melhores, pois previne a existência de pontos superaquecidos (*hot spots*) que podem provocar estresse no encapsulamento devido a diferença de temperatura e coeficientes de dilatação.

A influência do tempo de chaveamento na temperatura do encapsulamento foi observada simulando o MOSFET de potência com cargas resistivas iguais exceto pelo tempo de chaveamento de suas curvas de tensão e corrente. Nesta simulação foi aproveitado o modelo desenvolvido para a simulação montagem interna *Exposed Pad* com *heavy gauges* de alumínio, pois foi o modelo simulado mais próximo de um modelo comercial existente.

Os resultados obtidos por meio dessas simulações mostram que o aquecimento do encapsulamento será maior com o aumento do tempo de chaveamento, porque a potência total dissipada pelo MOSFET de potência é diretamente proporcional ao tempo de chaveamento. Foi observado que é necessário um aumento muito grande no tempo de chaveamento para se aumentar alguns graus na temperatura do encapsulamento. Portanto, acredita-se que para um número pequeno de chaveamentos a alteração na temperatura provocada pela variação do tempo de chaveamento é pouco relevante. Entretanto, ao operar em maiores frequências a variação da temperatura provocada pela alteração do tempo de chaveamento passa a ser relevante, devido ao grande número de chaveamen-

tos que ocorrem nesta situação.

5.1 Propostas para trabalhos futuros

Ficam como sugestões para trabalhos futuros:

- A substituição de modelos bidimensionais por modelos tridimensionais que possibilitarão análises mais precisas. Pois os artigos da literatura [12, 14, 15, 28] reportam que para obter-se bons resultados, o modelo utilizado na simulação deve ser o mais próximo possível do modelo real. Portanto, modelos tridimensionais produzirão melhores resultados.
- A simulação de outras montagens internas, por exemplo: *double face full joints (DFFJ)*, *double face ball joints (DFBJ)* e *direct bonding copper (DBC)*.
- Acoplar a análise mecânica às análises térmica e elétrica. Pois quando o encapsulamento é exposto a um ciclo térmico por longos períodos existe um estresse nas regiões onde os coeficientes de dilatação são diferentes, podendo ocorrer uma fratura do material. Fazendo uma análise mecânica é possível identificar os possíveis pontos de fratura e buscar soluções para evitá-la.
- Simular a interação térmica entre dois ou mais dispositivos (chip encapsulado), adicionando na análise a transmissão de calor por radiação. Pois os dispositivos são empregados em placas eletrônicas onde existem outros componentes e interação térmica entre eles influenciará o aquecimento do mesmo.

Referências Bibliográficas

- [1] O. Semenov, A. Vassighi, M. Sachdev, A. Keshavarzi, and C.F. Hawkins. Effect of cmos technology scaling on thermal management during burn-in. *Semiconductor Manufacturing, IEEE Transactions on*, 16(4):686 – 695, 2003.
- [2] S. Borkar. Design challenges of technology scaling. *Micro, IEEE*, 19(4):23 –29, 1999.
- [3] F. Pollack. New microarchitecture challenges in the coming generations of cmos process technologies, 1999. <http://hpc.ac.upc.edu/Talks/dir07/T000065/slides.pdf>.
- [4] Robert F. Pierret. *Field Effect Devices*, volume IV. Addison-Wesley, 1990.
- [5] B. Jayant Baliga. *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. Springer, 2008.
- [6] Muhammad H. Rashid, editor. *Power Electronics Handbook*. Elsevier Inc., 2007.
- [7] Adrian Bejan and Allan D. Kraus. *Heat Transfer Handbook*. John Wiley e Sons, 2003.
- [8] John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V. *A Heat Transfer Textbook*. Phlogiston Press, 2008.
- [9] Freescale Semiconductor. Thermal analysis of semiconductor systems. Technical report, 2008. <http://www.freescale.com>.
- [10] William D. Brown. *Advanced Eletronic Packaging*. IEEE Press, 1999.
- [11] Jacobus W. Swart. *Semicondutores: fundamentos, técnicas e aplicações*. Editora da UNI-CAMP, 2008.

- [12] T. Anzawa, Qiang Yu, T. Shibutani, and M. Shiratori. Reliability evaluation for power electronics device using electrical thermal and mechanical analysis. In *Electronics Packaging Technology Conference, 2007. EPTC 2007. 9th*, pages 94 –99, 2007.
- [13] B. Zandi, J. Lewis, H. Lewis, and M. Severson. Transient coupled thermal/electrical analysis of a printed wiring board. In *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2004. ITherm '04. The Ninth Intersociety Conference on*, pages 532 – 536 Vol.1, 2004.
- [14] K. Pandya and S. Jaunay. Thermal analysis of power mosfets using rebecca-3d thermal modeling software (from epsilon ingenierie) versus physical measurements and possible extractions. In *Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, 2005. EuroSimE 2005. Proceedings of the 6th International Conference on*, pages 394 – 397, 2005.
- [15] P. Cova, N. Delmonte, and R. Menozzi. Thermal characterization and modeling of power hybrid converters for distributed power systems. 46:1760–1765, 2006.
- [16] Kim Gauen. Relay replacement with extreme switches, 2009.
- [17] Freescale Semiconductor. Quad high side switch. Technical report, 2007.
<http://www.freescale.com>.
- [18] Freescale Semiconductor. Power quad flat no-lead (pqfn) package. Technical report, 2007.
<http://www.freescale.com>.
- [19] Karl Hess. *Advanced Theory of Semiconductor Devices*. John Wiley e Sons, 2009.
- [20] S. M. Sze and Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley e Sons, 2007.
- [21] Jack Philip Holman. *Heat Transfer*. MacGraw-Hill, 1986.
- [22] Frank Kreith, editor. *The CRC Handbook of Thermal Engineering*. CRC Press LLC, 2000.

- [23] Mark W. Zemansky and Richard H. Dittman. *Heat and thermodynamics*. MacGraw-Hill, 1997.
- [24] Frank Kreith. *Princípios da Transmissão de Calor*. Editora Edgard Blücher LTDA., 1977.
- [25] Joe F. Thompson, Bharat K. Soni, and Nigel P. Weatherill. *Handbook of Grid Generation*. CRC Press, 1999.
- [26] Sheng-Chih Lin and K. Banerjee. An electrothermally-aware full-chip substrate temperature gradient evaluation methodology for leakage dominant technologies with implications for power estimation and hot-spot management. In *Computer-Aided Design, 2006. ICCAD '06. IEEE/ACM International Conference on*, pages 568 –574, 2006.
- [27] Kwang Won Kon, Song Woon Kim, and Sang Bae Park. Leadless semiconductor package and manufacturing method thereof, 2006. <http://www.freepatentsonline.com/7053469.html>.
- [28] Juliano Fujioka Mologni, Frank Kenji Goto, Didimo Neto, Marco Antonio Robert Alves, Edmundo da Silva Braga, Douglas de Freitas Takeuti, and Ricardo da Silva Braga. Potencial nanotechnology applications on automotive electrical/electronic architecture. *SAE Technical Paper Series*, 2008.